

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
LISANNE CHAUVETTE

ANALYSE DE L'ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE
D'UN CHENAL DANS UN CONTEXTE DE REBOISEMENT.
CAS DE LA RIVIERE MATAMBIN DANS LA ZONE AGRICOLE

AOÛT 2012

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

AVANT-PROPOS

L'aboutissement de ce travail laborieux a pu prendre forme suite à un travail de longue haleine et s'avère pour moi une victoire personnelle. Nombre d'embûches et de remises en question ont parsemé cette recherche et celle-ci n'aurait pu aboutir sans l'aide de certaines personnes que j'aimerais remercier :

M. Ali A. Assani, directeur de recherche, UQTR

M. Stéphane Campeau, co-directeur, UQTR

M. Denis Leroux, professeur UQTR, membre du comité d'orientation

M. Denis Gratton, professeur UQTR, membre du comité d'orientation

Ma famille et mes collègues

RÉSUMÉ

Cette étude avait pour but d'analyser l'évolution morphologique du chenal de la rivière Matambin, tributaire majeur de la rivière Maskinongé, en relation avec les changements hydrologiques et d'affectation des sols. Il est bien connu et établi que les activités agricoles induisent des modifications aux conditions hydrologiques, notamment au niveau des conditions de ruissellement et d'infiltration. Cependant, il existe peu d'études sur leurs impacts sur la morphologie des chenaux. Cette étude analysera les effets des changements d'affectation du sol sur l'évolution de la largeur et de la sinuosité du chenal de la rivière Matambin en relation avec la variabilité des débits dans la région.

Pour ce faire, différentes analyses ont été effectuées, et ce, à trois niveaux : la variabilité interannuelle des débits (variabilité interannuelle des débits maximaux et moyens journaliers) des rivières Maskinongé et L'Assomption ainsi que l'évolution temporelle de l'usage des sols (superficies boisées et drainage) et de la morphologie du chenal (largeur à plein bord et sinuosité). La variabilité interannuelle des débits a été analysée au moyen de la méthode de Lombard. L'évolution temporelle de l'usage des sols et de la morphologie du chenal a été étudiée au moyen d'une analyse diachronique des photographies aériennes prises pendant les années 1935, 1964, 1975, 1997 et 2008.

En ce qui concerne la variabilité interannuelle, la méthode de Lombard a mis en évidence un changement significatif de la moyenne des débits hivernaux (maximum et moyens journaliers) et de la hausse de la fréquence des débits de forte magnitude durant les quatre saisons pour les deux rivières après 1970. Quant à l'évolution de l'usage de sols, on a observé une hausse de 32,37 % de la superficie des forêts (reboisement) dans le bassin versant de la rivière Matambin (reboisement) entre 1935 et 1964 d'une part, et une hausse de 25,57 % entre 1964 et 2008, d'autre part. De 1935 à 2008, la superficie de la forêt a ainsi augmenté d'environ 58 % au détriment de celle de l'agriculture. En ce qui concerne l'évolution morphologique du chenal, on a observé deux phases : une phase de diminution de la largeur moyenne à plein bord pendant la période 1935 à 1964 suivie d'une phase d'augmentation progressive après 1964. La diminution de la largeur observée pendant la première période serait due à celle de la fréquence des débits de forte magnitude observée avant 1970 et à une quantité de charge des sédiments en suspension relativement élevée transportée par la rivière étant donné que les effets du reboisement sur l'érosion du sol étaient encore limités pendant cette période (faible densité et jeune âge des arbres). La hausse progressive de la largeur observée depuis 1964 serait associée à celle de la fréquence des débits de forte magnitude et à une réduction progressive de la charge des sédiments en suspension en raison de la hausse de la superficie du couvert forestier dans la zone agricole.

Mots clés : Morphologie des chenaux, dynamique fluviale, équilibre des cours d'eau, sinuosité, méandres, reboisement, largeurs, agriculture

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	ii
RÉSUMÉ.....	iii
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
 CHAPITRE I	
INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte et problématique de la recherche.....	1
1.2 Objectifs et hypothèses de la recherche.....	4
1.2.1 Objectif général.....	4
1.2.2 Objectifs spécifiques et hypothèses	5
1.3 Dynamique fluviale et évolution morphologique des chenaux	5
1.3.1 Dynamique fluviale.....	5
1.3.2 Concept d'équilibre des cours d'eau.....	7
1.3.3 Morphologie des méandres	8
1.4 Effets de l'agriculture	12
1.4.1 Effets sur le cycle de l'eau et les conditions d'écoulements.....	12
1.4.2 Incidences sur la morphologie des chenaux	16
 CHAPITRE II	
MÉTHODOLOGIE	18
2.1 Site à l'étude	18
2.1.1 Choix de la zone étudiée.....	18
2.1.2 Portrait du bassin versant de la rivière Matambin	19
2.2 Source et traitement des données.....	21
2.2.1 Données hydriques.....	21
2.2.2 Fichiers.....	21
2.2.3 Photographies aériennes et orthophotographies	22
2.3 Analyse des photographies aériennes	22
2.3.1 Choix des photographies aériennes.....	22
2.3.2 Géoréférence et orthorectification	23
2.4 Analyses hydrologiques.....	24

2.4.1	Analyse de la variabilité interannuelle des débits.....	24
2.5	Analyse de l'évolution temporelle de l'usage des sols.....	27
2.6	Analyses morphologiques.....	27
2.6.1	Largeur.....	27
2.6.2	Sinuosité.....	30
2.6.3	Analyses statistiques sur les données morphologiques.....	30
2.6.4	Méandres abandonnés.....	31
CHAPITRE III		
RÉSULTATS.....		32
3.1	Variabilité interannuelle des débits	32
3.1.1	Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums et moyens journaliers saisonniers des rivières Maskinongé et de L'Assomption	32
3.1.2	Analyse de la variabilité interannuelle des débits maximums et moyens journaliers des rivières Maskinongé et L'Assomption au moyen de la méthode de Lombard.....	33
3.2	Géoréférence et orthorectification	37
3.2.1	Création d'un MNE	37
3.2.2	Géoréférence des photographies aériennes.....	38
3.3	Contexte d'usage des sols.....	38
3.3.1	Utilisation du sol.....	38
3.4	Contexte morphologique	40
3.4.1	Analyse de l'évolution de la largeur et de la sinuosité du chenal.....	40
CHAPITRE IV		
DISCUSSION		48
4.1	Variabilité interannuelle des débits	48
4.2	L'évolution de la superficie forestière et son impact sur les débits.....	50
4.3	Relation entre l'évolution de la couverture forestière, des débits et de la morphologie du chenal de la rivière Matambin.....	52
4.3.1	La période 1935-1964.....	52
4.3.2	La période 1964-2008.....	54
CHAPITRE V		
CONCLUSION.....		56
BIBLIOGRAPHIE.....		59

ANNEXE A

COMPARAISON DE LA VARIABILITÉ INTERANNUELLE DES DÉBITS MOYENS JOURNALIERS DES RIVIÈRES L'ASSOMPTION (EN BLEU) ET MASKINONGÉ (EN ROUGE)	67
---	-----------

ANNEXE B

RÉSULTATS OBTENUS LORS DU GEORÉFÉRENCEMENT DES PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES	70
---	-----------

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Illustration conceptuelle de la relation entre l'hydrologie, la géomorphologie et l'écologie des rivières et de la façon dont l'utilisation du sol modifie les processus hydrologiques et géomorphiques induisant ainsi des réponses écologiques (Poff <i>et al</i>).....	3
1.2 Trinité de la dynamique fluviale (Normand Bergeron, notes de cours, Formes et processus en milieu fluvial, INRS, Hiver 2008).....	6
1.3 Concept d'équilibre dynamique, développé par (Lane, 1955)	7
1.4 Éléments morphométriques de base d'un méandre (Bravard et Petit, 2000)	9
1.5 Effet de la diminution du couvert végétal sur les débits de crue et d'étiage (Muma, 2008)	14
2.1 Bassin versant de la rivière Matambin et localisation de la portion étudiée	19
2.2 Traçage des rives	28
2.3 Création d'une ligne médiane.....	28
2.4 Attribution des points de référence.....	28
2.5 Génération, coupe et ajustement des perpendiculaires	29
2.6 Création du polygone de chenal	29
3.1 Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums journaliers hivernaux des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge)	35
3.2 Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums journaliers printaniers des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge)	35

3.3	Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums journaliers estivaux des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge)	36
3.4	Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums journaliers automnaux des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge).....	36
3.5	Modèle d'élévation numérique du bassin versant de la rivière Matambin	37
3.6	Évolution de la superficie reboisée (en %) dans le territoire d'étude	39
3.7	Évolution de la surface en forêt dans la zone étudiée, entre 1935 et 2008.....	40
3.8	Méandres recoupés sur la rivière Matambin.....	42
3.9	Méandre recoupé 1	43
3.10	Méandre recoupé 2	44
3.11	Méandre recoupé 3	45
3.12	Méandres recoupés 4 et 5	46
3.13	Méandre recoupé 6	47
A1	Comparaison de la variabilité interannuelle des débits moyens journaliers hivernaux des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge)	67
A2	Comparaison de la variabilité interannuelle des débits moyens journaliers printaniers des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge)	68
A3	Comparaison de la variabilité interannuelle des débits moyens journaliers estivaux des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge)	68
A4	Comparaison de la variabilité interannuelle des débits moyens journaliers automnaux des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge).....	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Caractéristiques des photographies aériennes utilisées	23
3.1 Coefficients de corrélation calculés entre les débits maximums et moyens journaliers des rivières Maskinongé et L'Assomption (1930-2008)	32
3.2 Variabilité interannuelle des débits maximums et moyens journaliers de la rivière L'Assomption à la station de Joliette (1930-2008) Valeurs de la statistique Sn de Lombard pour les moyennes des séries	34
3.3 Comparaison de la fréquence des forts débits maximums journaliers de la rivière L'Assomption à la station de Joliette avant et après 1964	34
3.4 Évolution de la superficie en boisés dans le bassin versant de la rivière Matambin, à l'intérieur du cadre d'étude	39
3.5 Évolution de la largeur et de la sinuosité du chenal de la rivière Matambin entre 1935 et 2008	41
3.6 Comparaison des valeurs moyennes de la largeur à pleins bords du chenal de la rivière Matambin entre 1935 et 2008 au moyen de la méthode d'analyse de variance à un seul critère de classification	41
3.7 Comparaison des valeurs moyennes de la largeur à pleins bords du chenal de la rivière Matambin entre 1935 et 2008 au moyen de la méthode de Tukey Matrice de probabilité	41
B1 Résultats obtenus lors du géoréférencement de l'année 1935	70
B2 Résultats obtenus lors du géoréférencement de l'année 1964	71
B3 Résultats obtenus lors du géoréférencement de l'année 1975	71
B4 Résultats obtenus lors du géoréférencement de l'année 1997	72

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Contexte et problématique de la recherche

L'humain a, depuis longtemps, considérablement modifié le milieu physique qui l'entoure afin de l'adapter à ses besoins. Les forêts, les cours d'eau, les milieux humides, tous ont constitué des ressources ou des obstacles au développement des activités humaines. Parmi ces adaptations et changements induits dans l'environnement, beaucoup concernaient et concernent encore le besoin d'optimiser les rendements agricoles, nécessitant de grandes superficies (Gregory, 2006; James et Marcus, 2006).

Les impacts des activités agricoles sont nombreux et ont été abondamment étudiés durant les dernières décennies. Ces études concernent essentiellement les changements hydrologiques et sédimentaires, impliquant des modifications dans les conditions d'écoulement sur les versants et dans les vallées. Plus précisément, sur les versants, on observe parmi ces impacts un accroissement du ruissellement de surface qui génère une hausse des débits de pointe de crue et de la charge en suspension (Poff *et al.*, 2006; Wissmar *et al.*, 2004). Il a été ainsi démontré que les activités agricoles pouvaient influencer de manière significative l'évolution morphologique des cours d'eau à la suite des modifications des conditions d'écoulement (Allan, 2004; Clark et Wilcock, 2000; Gregory, 2006; Harden, 2004; Hooke, 2006; James et Marcus, 2006; Keesstra *et al.*, 2005; Menv, 2003; Peterson et Kwak, 1999; Tomer *et al.*, 2005; Urban et Rhoads, 2003; Vanacker *et al.*, 2005; Wissmar *et al.*, 2004;). Ces nouvelles conditions peuvent affecter la qualité et la quantité d'eau et conséquemment, la faune et la flore aquatiques, comme le suggère un peu plus loin la figure 1.1.

Pour restaurer et assurer l'intégrité écologique des écosystèmes fluviaux affectés par les activités anthropiques en vue notamment de conserver leur biodiversité, il est impératif de quantifier tous les changements qui affectent l'hydrologie, la morphologie

et la biologie de ces cours d'eau influencés par les activités anthropiques. Cette quantification permettra ultérieurement l'élaboration des normes de gestion efficaces. C'est dans cette perspective que le professeur Ali Assani, enseignant au département de géographie de l'Université du Québec à Trois-Rivières, a élaboré un programme de recherche destiné à analyser les impacts des activités anthropiques sur les écosystèmes fluviaux du Québec méridional. Ce programme s'intéresse particulièrement aux deux principales activités suivantes : les barrages hydroélectriques et l'agriculture. En ce qui concerne le premier type d'activité, de nombreux travaux ont été déjà réalisés sur les impacts hydrologiques, morphologiques et végétatifs induits par les barrages (Assani *et al.*, 2002, 2005, 2007, 2008, 2006, 2003, 2006; Gravel, 2006; Lajoie *et al.*, 2006, 2007; Matteau, 2008; Matteau *et al.*, 2006; Milette, 2008; Stichelbout, 2005). Quant au second type d'activité, il existe encore très peu d'études. Muma *et al.* (2011) ont analysé les impacts hydrologiques induits par la transformation des surfaces boisées en zones agricoles au Québec méridional. En revanche, aucune étude n'est encore entreprise sur l'impact de l'agriculture sur l'évolution morphologique des chenaux dans le cadre de ce programme de recherche et, de manière générale, peu d'études sont encore consacrées à ce sujet au Québec (Brien, 2006). La plupart des travaux qui ont été consacrés à l'analyse des impacts de cette expansion agricole sur les bassins versants se sont intéressés à la détérioration de la qualité de l'eau de surface et souterraine ainsi qu'aux processus érosifs sur les versants et au transport de la charge en suspension. Dans ce contexte, notre étude vise à contribuer à la quantification des changements morphologiques des chenaux induits par les activités agricoles en relation avec les changements des débits. En effet, comme le montre la figure 1.1, il existe une relation étroite entre les changements hydrologiques, morphologiques et biologiques provoqués par l'utilisation du sol.

Au 20^e siècle, le Québec a vécu une période importante dans l'expansion des activités agricoles. Cette expansion s'est traduite par une mécanisation, une intensification des réseaux de drainage et une rectification du chenal de nombreuses rivières (Beaulieu, 1999, révisé en 2001; Menv, 2003). Il va sans dire que tous ces aménagements et ces travaux ont significativement modifié les conditions de

ruissellement et de transport des sédiments sur les versants et dans les vallées. Il en résulterait ainsi une hausse des débits de crues en raison d'une augmentation du taux de ruissellement sur les versants et la rectification des chenaux (disparition des méandres qui réduisent la vitesse de propagation de l'onde de crues), et d'autre part, d'une hausse de la quantité des sédiments transportés en suspension en raison de l'érosion importante des versants et des berges.

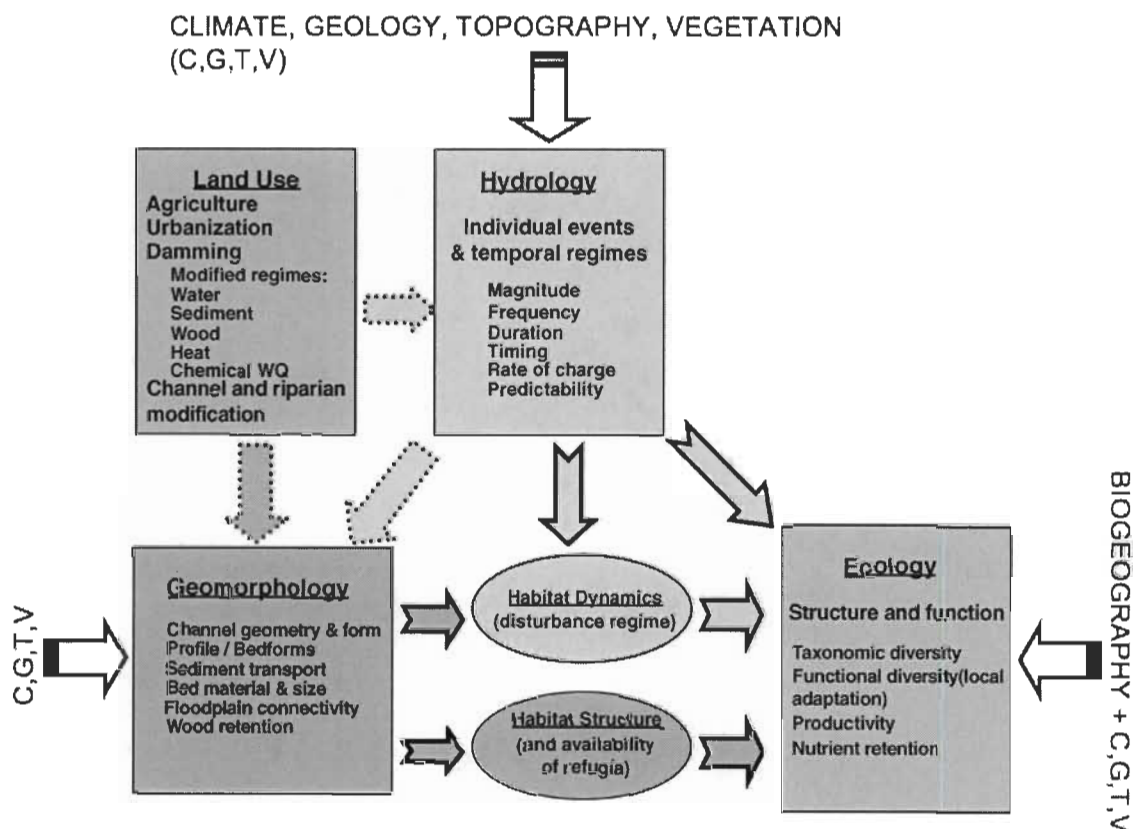


Figure 1.1 : Illustration conceptuelle de la relation entre l'hydrologie, la géomorphologie et l'écologie des rivières et de la façon dont l'utilisation du sol modifie les processus hydrologiques et géomorphiques induisant ainsi des réponses écologiques (Poff *et al*).

Voici globalement les facteurs d'influence majeurs, naturels et artificiels, ayant un effet sur les conditions hydromorphologiques d'un cours d'eau :

- Les précipitations;
- La pédologie (nature des dépôts de surface);

- L'espace de liberté naturel (mouvements naturels du chenal et recouplement naturel des méandres);
- La linéarisation artificielle;
- Le déboisement, la dénudation et imperméabilisation des sols et les coupes forestières;
- La présence ou l'absence de bandes riveraines;
- Le drainage de surface et souterrain;
- La présence de barrages.

Dans le cadre de cette étude, nous avons donc tenté de tenir compte de plusieurs facteurs afin d'évaluer l'évolution morphologique de la rivière Matambin, le principal affluent de la rivière Maskinongé dans la région de Lanaudière.

1.2 Objectifs et hypothèses de la recherche

1.2.1 Objectif général

L'objectif du présent projet de recherche est d'analyser l'évolution morphologique du chenal principal de la rivière Matambin en relation avec les changements potentiels des débits et de l'utilisation des sols. L'hypothèse générale qui sous-tend cet objectif est la suivante : les changements des conditions de ruissellements et de transport des sédiments induits par les activités agricoles sur les versants et dans les vallées sont susceptibles de modifier l'évolution morphologique des chenaux. Cette modification serait amplifiée par les changements hydrologiques résultant de la variabilité naturelle du climat et/ou des changements climatiques.

1.2.2 Objectifs spécifiques et hypothèses

Les informations recueillies de même que l'objectif général défini préalablement nous ont donc permis de raffiner les visées de cette étude. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- 1) Quantifier la variation temporelle de la largeur du chenal de la rivière Matambin

❖ *Hypothèse soutenue* : La largeur du chenal devrait augmenter dans le temps en raison de la hausse de l'intensité de l'érosion des berges provoquée par la hausse des débits de crues et de la vitesse de propagation de leur onde dans les chenaux.

- 2) Analyser l'évolution de la sinuosité du chenal

❖ *Hypothèse soutenue* : La hausse de la fréquence des débits de crues supérieurs au débit à plein bord favoriserait une augmentation de la fréquence des inondations dans les plaines alluviales provoquant ainsi un recoupement plus fréquent des méandres actifs. Ce dernier processus entraînerait une diminution de la sinuosité.

- 3) Évaluer la corrélation entre l'évolution des débits journaliers et saisonniers maximums et moyens et les changements morphologiques du chenal

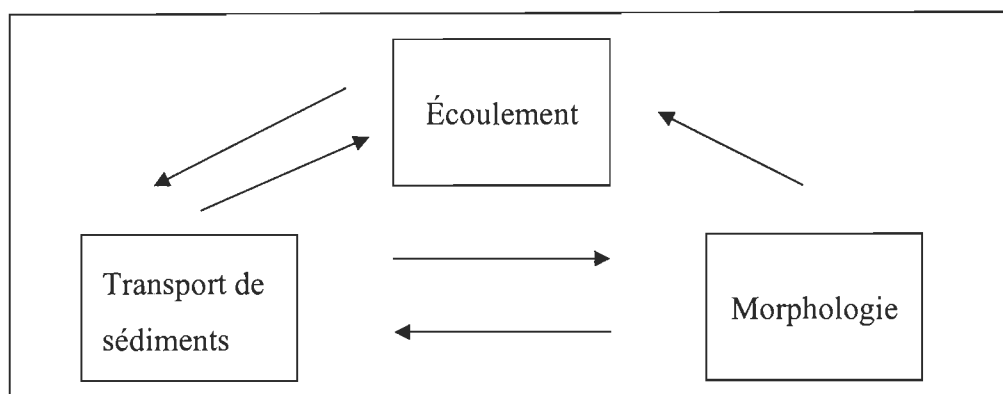
❖ *Hypothèse soutenue* : L'augmentation de la largeur du chenal et la diminution de la sinuosité surviendront parallèlement (de façon corrélée) à une augmentation des débits dans le temps.

1.3 Dynamique fluviale et évolution morphologique des chenaux

1.3.1 Dynamique fluviale

La trinité de la dynamique fluviale explique le lien complexe régissant les mouvements de flux (liquide et solide) et les éléments de morphologie (figure 1.2). Les

éléments impliqués et inter-reliés en tout temps sont donc l'écoulement, le transport de sédiments et la morphologie du cours d'eau :



Écoulement :	Transport de sédiments :	Morphologie :
○ Débit (Q)	○ Mise en mouvement	○ Formes du lit
○ Vitesse moyenne (U)	○ Modes de transport	○ Taille du chenal
○ Turbulence	○ Taux de transport	○ Forme du chenal
○ Profil de vitesse	○ Érosion et accumulation	○ Forme en plan
○ Force de cisaillement (τ)		○ Pente

Figure 1.2 : Trinité de la dynamique fluviale (Normand Bergeron, notes de cours, Formes et processus en milieu fluvial, INRS, Hiver 2008).

Les liens présentés dans la trinité de Leeder démontrent bien l'influence mutuelle entre les trois variables de la dynamique fluviale. Ces éléments s'influenceront mutuellement au cours du processus à l'exception de la morphologie, qui est régie uniquement par les mises en mouvement de sédiments, que ce soit via l'érosion des berges et du lit ou la sédimentation (Bergeron, 2008). Ce qui importe ici, c'est aussi de noter l'aspect circulaire du processus, c'est-à-dire que l'un influençant l'autre, le cours d'eau constitue un élément dynamique où chaque modification induite dans l'une ou l'autre de ces trois variables impliquera un changement systématique et progressif dans la dynamique hydromorphologique. Ce concept est bien démontré dans la théorie d'équilibre dynamique des cours d'eau.

1.3.2 Concept d'équilibre des cours d'eau

On considère généralement que, dans un cours d'eau, un système d'équilibre complexe façonne la géométrie du chenal et influence les conditions d'écoulement internes. Le concept d'équilibre dynamique, développé par Lane (1955), indique qu'après une perturbation, l'équilibre entre les énergies et les flux de sédiments à l'intérieur du système cherchera à se rétablir le plus près de son état d'origine (Bravard et Petit, 2000; Jorgensen et Harbor, 1998). Chacun des facteurs de réponse continue d'évoluer, mais ceux-ci se compensent en fonction d'un ajustement mutuel, tel que démontré à la figure 1.3 :

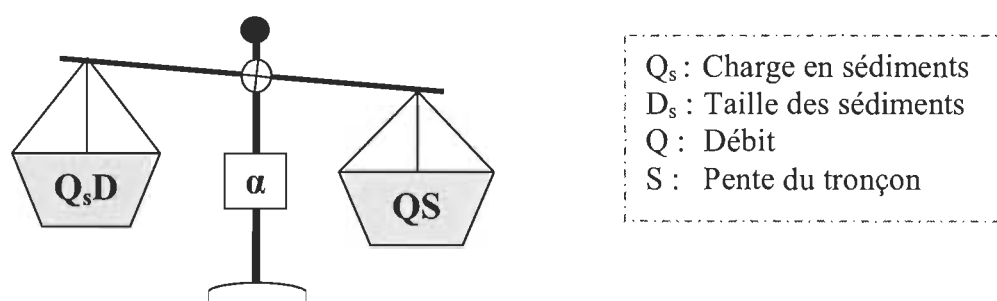


Figure 1.3 : Concept d'équilibre dynamique, développé par (Lane, 1955).

Cette relation ou effet de balancier indique que la pente et les débits sont directement proportionnels avec la quantité et la taille des sédiments déplacées par le cours d'eau (Lane, 1955; Rosgen, 1996). Lorsqu'une modification survient sur l'un ou plusieurs de ces paramètres dynamiques impliqués, un réajustement s'opérera sur le reste des variables du lit mobile, visant à restaurer les conditions d'équilibre.

Dans le contexte qui nous intéresse ici, soit les modifications liées à la présence de l'agriculture, les apports en flux liquides et solides viendront modifier d'une part, les débits et d'autre part, la charge et la taille des sédiments. Suivant nos hypothèses et la dynamique d'équilibre régissant le système fluvial, une importante charge en sédiments est transportée dans les cours d'eau agricoles que ce soit via le ruissellement ou l'érosion des berges. Ainsi, selon la théorie, on observera subséquemment une dégradation du lit et des berges à l'amont, puis une aggradation à l'aval. Celle-ci aura

pour effet d'abaisser la pente du chenal, de diminuer les vitesses, d'augmenter la sinuosité et la largeur du cours d'eau à l'aval, l'inverse se produisant en amont. Dans le contexte étudié, deux aspects majeurs liés à l'exploitation agricole sont susceptibles d'influer sur la condition hydro-morphologique des cours d'eau : le ruissellement de surface et le redressement artificiel des cours d'eau.

Ruissellement de surface

Le déboisement des versants et des berges accentue le ruissellement de surface avec comme conséquences :

- L'augmentation de la charge en sédiments vers les cours d'eau (haussement du lit);
- L'augmentation de la vitesse des apports en eau, donc augmentation des débits de pointe.

Redressement des cours d'eau

La linéarisation artificielle des cours d'eau modifie de façon accélérée les vitesses et débits par une réduction de la sinuosité et l'élimination de méandres. Il en résulte :

- Une augmentation des débits de pointe et du temps de réponse du bassin versant;
- Un transport de sédiments provenant du lit en amont, l'apport sédimentaire accru vers l'aval, l'augmentation de la pente en amont et la réduction de la pente en aval.

1.3.3 Morphologie des méandres

La nature des sols et de la topographie constituent des facteurs déterminants dans la morphologie des méandres (figure 1.4). Les flux liquides et solides sont responsables, pour leur part, des processus d'ajustements et des irrégularités. Il existe trois grands

types de méandres (Bravard et Petit, 2000) : les méandres encaissés, imprimés dans les vallées et fortement influencés par la lithologie, les méandres de plaine alluviale, plus dynamiques, et les méandres ancrés, constituant un type intermédiaire entre l'un et l'autre. Les rivières impliquées dans cette recherche s'inscrivent davantage dans le type de méandre de plaine alluviale, défini par des conditions de migration à l'intérieur de dépôts fins (limons et argiles) et éprouvant des processus dynamiques d'érosion et de sédimentation.

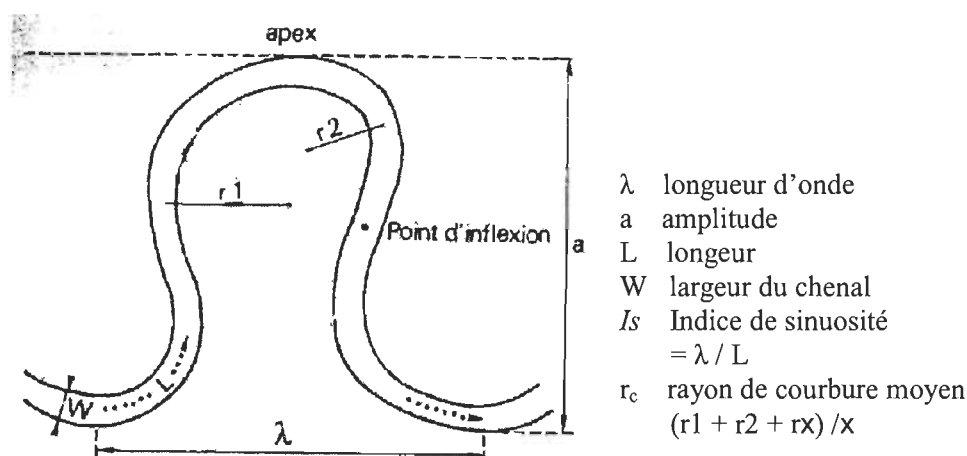


Figure 1.4 : Éléments morphométriques de base d'un méandre (Bravard et Petit, 2000).

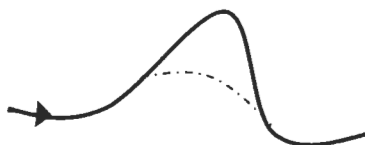
Les dépôts alluviaux forment la partie convexe du méandre dont la partie interne se rattachera progressivement à la surface du lit majeur (Bravard et Petit, 2000). Des bancs relativement stables s'accumulent et ainsi, cette accrétion latérale de la charge de fond sera la cause de la progression de l'apex du méandre (partie externe de la convexité). L'érosion latérale de la rive convexe des méandres, qui permet donc le développement du méandre, constitue le phénomène précurseur du recoupement du méandre (cut-offs). La composition du substrat formant les berges est particulièrement déterminante dans les mouvements érosifs et la migration des chenaux. La forme du profil transversal des chenaux est liée à la cohésion des berges, plus précisément à la proportion d'argiles et de limons dont le lit et les berges sont composés (Bergeron et Roy, 1985). Lorsque la sinuosité du chenal devient trop importante, la compétence du chenal diminue fortement et la charge de fond est difficilement transportée, créant ainsi

des conditions de sédimentation, d'élévation du niveau du lit, de perte de vitesse, etc. Toujours dans l'optique de conserver un équilibre dans le cours d'eau, les recoupements auront donc pour effet de :

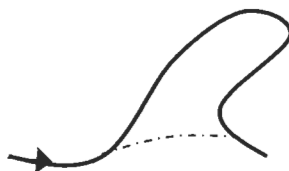
- diminuer la sinuosité du chenal;
- accentuer la pente du chenal et favoriser l'érosion du lit;
- améliorer le transport et l'évacuation de la charge de fond, imposant ainsi la stabilité de la sinuosité.

Bravard et Petit (2000) indiquent que plus le rapport entre le rayon de courbure et la largeur du chenal diminue plus la courbure du méandre est refermée. Le recoupement se produit lorsque le rapport est égal à 2. Il existe deux types majeurs de recoupement (Gay *et al.*, 1998; Hooke, 1995) :

- *Recoupements par tangence* (neck cut-off), qui se produit par le resserrement progressif du pédoncule. Celui-ci est courant dans les milieux à faible pente, sur des terrains limoneux et où les crues sont peu marquées.



- *Recoupement par déversement* (chute cut-off), créé par la rupture du méandre à la suite de débordements fréquents qui usent la convexité.



La migration des méandres et leur développement se produisent en période de crue modérée. Malgré le fait que le recoupement de méandre est le résultat d'un long processus de migration, plusieurs auteurs ont noté une tendance des recoupements à se

produire lors de périodes de fortes crues, plus précisément lors d'un événement extrême de fréquence rare. Plusieurs hypothèses cherchent tout de même à expliquer le phénomène de recoupement de méandres (Hooke, 2004) :

- Le recoupement est un système auto-organisé et se produit lorsque le système atteint un niveau chaotique.
- Le recoupement fait partie de l'évolution des méandres et n'est pas nécessairement généré par un événement catastrophique.
- Des débits exceptionnellement élevés durant une longue période pourraient entraîner un recoupement.
- Le recoupement est causé par un ajustement induit par des modifications des conditions d'écoulement et autres conditions externes.
- Il peut s'agir également d'un changement amorcé par un recoupement artificiel.

La période d'érosion peut être particulièrement longue avant la brèche menant à un recoupement. Selon Hooke (1995), l'événement à l'origine de la rupture n'est pas nécessairement intense, mais, du moins, associé à un événement de pointe. Il évoque également que les phénomènes de recoupements multiples peuvent être attribués à plusieurs causes (Hooke, 2004) :

- L'urbanisation;
- Les variations climatiques;
- L'alternance entre les périodes sèches et humides (inondations saisonnières);
- Les caractéristiques intrinsèques des méandres.

Les bras morts laissés par un recoupement constituant des milieux humides régulateurs et riches en biodiversité, un comblement sédimentaire et la diminution de ceux-ci pourraient diminuer la qualité de leurs rôles. En tant que milieux humides, les méandres recoupés permettent de réduire l'intensité des crues et des inondations,

contribuent à la recharge de la nappe aquifère et en bref, participent à la régulation des conditions hydriques du bassin versant (Bullock et Acreman, 2003; Constantine et Dunne, 2008). Ceux-ci possèdent également un rôle important dans la construction de la plaine alluviale et dans le rythme de migration des méandres (Bullock et Acreman, 2003; Constantine et Dunne, 2008; Hooke, 2004).

1.4 Effets de l'agriculture

Il existe généralement trois types ou classes d'utilisation du sol : les moins perturbés possédant un fort couvert naturel, les terres agricoles et les milieux urbains caractérisés par la concentration des activités anthropiques (Poff *et al.*, 2006). Il existe de nombreux mécanismes qui régissent les impacts de l'utilisation du sol et ceux-ci dépendent également des échelles utilisées. Il est donc parfois ardu d'isoler les effets de l'agriculture, car les gradients des modifications induits varient de manière interdépendante. Cette covariation et l'absence de linéarité dans les réponses rendent l'analyse plus laborieuse. Il est d'autant plus difficile d'interpréter les mécanismes du fait qu'ils subissent parfois les effets rétroactifs d'événements ponctuels ou linéaires historiques. Cependant, certaines études sont parvenues à relever les effets des activités agricoles sur les conditions d'écoulement (Armstrong et Martz, 2007; Harden, 2004; Mathier et Roy, 1992; Peterson et Kwak, 1999; Poff *et al.*, 2006; Tomer *et al.*, 2005; Vanacker *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2007; Wissmar *et al.*, 2004) et la morphologie des chenaux (Clark et Wilcock, 2000; Durocher et Roy, 1986; Keesstra *et al.*, 2005; Leduc et Roy, 1990; Urban et Rhoads, 2003).

1.4.1 Effets sur le cycle de l'eau et les conditions d'écoulements

De façon globale, la dénudation des sols est à l'origine d'un nombre important de changements dans les processus hydriques d'un bassin versant. Les modifications se produisent davantage à l'échelle de la zone déboisée, mais elles ont des répercussions sur l'ensemble du territoire du bassin versant (concept d'équilibre dynamique expliqué précédemment, section 1.3). Les impacts sur le sort des eaux de pluie engendrés par le

déboisement et le changement de vocation des terres en zones agricoles se traduisent globalement par :

- Une baisse de l'interception des eaux de pluie;
- L'augmentation du ruissellement;
- La baisse de l'infiltration;
- La baisse de l'évapotranspiration.

La présence de l'agriculture dans un bassin versant influence de façon importante l'équilibre existant sur le territoire entre les flux et réponses. Les conditions d'écoulement seront affectées par le déboisement ainsi créé et la baisse de la rugosité des sols. Cette nouvelle dynamique modifiera les phénomènes d'évapotranspiration soit par une baisse de celle-ci. La végétation ayant comme effet d'intercepter l'eau de ruissellement, la dénudation des sols augmente le taux de ruissellement au sol de l'eau de pluie (Muma, 2008; Poff *et al.*, 2006).

En effet, les cultures du sol agissent sur les phénomènes d'infiltration des eaux dans le sol. La dénudation des sols et le compactage de ceux-ci entraînent une diminution de l'infiltration et subséquemment une augmentation du ruissellement de surface et une baisse de la recharge des nappes aquifères (Poff *et al.*, 2006; Wissmar *et al.*, 2004; Tomer *et al.*, 2005). Clark et Wilcock (2000) ont identifié, au nord-est de Puerto Rico, une augmentation du ruissellement de surface en milieu agricole d'environ 50 %. Ils ont également noté une tendance accrue aux glissements de terrain et au ravinement de même qu'au transport d'une quantité importante de sédiments grossiers dans la charge sédimentaire s'écoulant vers le cours d'eau, et ce, au niveau des terres déboisées s'étendant dans les vallées escarpées. Implicitement, ces phénomènes de ruissellement entraîneront un apport accru en sédiments au cours d'eau et, ainsi, une altération des sols et de leur utilisation. L'apport en eau de ruissellement tend à créer des conditions d'écoulement particulières : on observera une diminution des débits minimums (débits d'étiage très bas), en raison de la perte d'infiltration d'eau vers les nappes souterraines et donc, de la réduction de la recharge du cours d'eau en période sèche. L'importance du ruissellement de surface en période de crue, tel qu'expliqué plus

haut, apportera au cours d'eau une charge liquide supérieure, mais de manière accélérée. La magnitude et l'intensité des débits maximums seront accentuées (création de conditions éclair), mais la durée des vitesses de pointe aura tendance à être inférieure par rapport aux zones boisées. En effet, les pics de crue seront davantage liés à l'importance des surfaces saturées près des cours d'eau, qu'à l'intensité et la durée des crues (Bravard et Petit, 2000). La réduction de la recharge des nappes ne pourra plus soutenir le débit de base. Poff *et al.* (2006) mentionnent dans l'étude qu'ils ont menée aux États-Unis que les cours d'eau affectés par le milieu agricole possédaient des pics de crue de 8 à 33 % plus élevés qu'en milieu naturel. Cette donnée est cependant moindre que pour les régions affectées par les activités urbaines, qui se voient affectées par des pics de crue de 22 à 44 % supérieurs. La figure 1.5 présente schématiquement les impacts de la perte de superficie en forêt et de la présence d'agriculture.

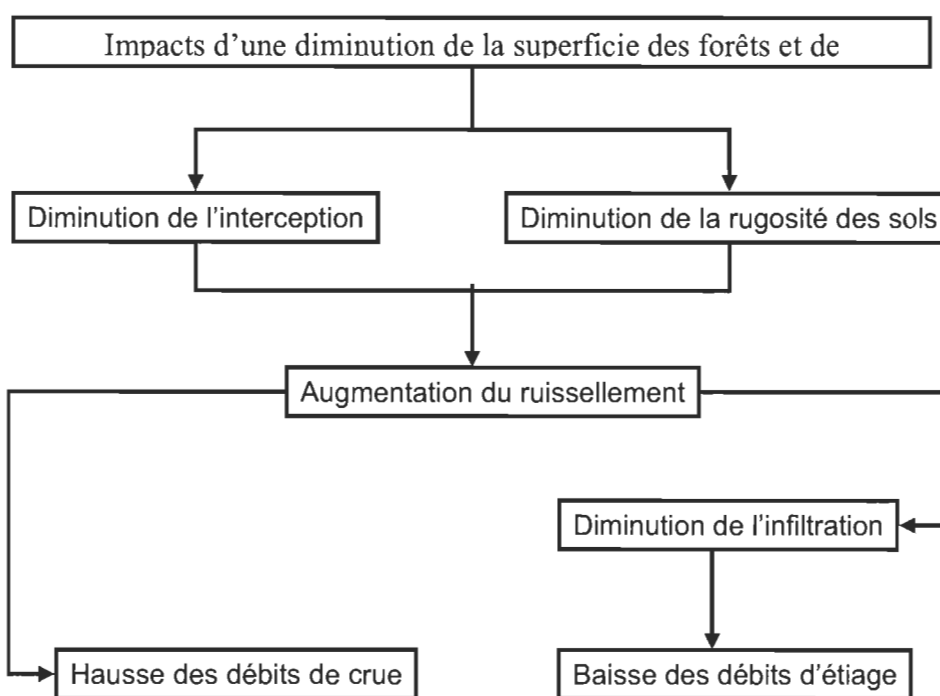


Figure 1.5 : Effet de la diminution du couvert végétal sur les débits de crue et d'étiage (Muma, 2008).

Mentionnons parmi les pratiques agricoles ayant un effet sur l'eau : le drainage de surface et souterrain ainsi que le déboisement des rives. Ces deux pratiques ont été

longtemps utilisées afin de maximiser les rendements des cultures. L'intensité de drainage réel des terres incluant le drainage souterrain est cependant beaucoup plus difficile à calculer.

Bandes riveraines

Les bandes riveraines jouent un rôle majeur et reconnu dans la dynamique hydro-morphologique. On retrouve parmi ses très nombreux rôles (St-Jacques et Richards, 1998) :

- Contrôle et réduction du ruissellement de surface;
- Rétention et filtration des sédiments, contaminants et nutriments provenant du ruissellement de surface;
- Contrôle de l'érosion (réduction des zones préférentielles d'écoulement (diffusion) qui prévient l'érosion des berges en stabilisant le sol et en ralentissant la migration des méandres);
- Régulation de la température (effet d'ombrage);
- Apports en débris et nutriments pour les écosystèmes aquatiques. Certains débris comme les bois morts peuvent ralentir l'érosion des berges (Assani et Petit, 1995) ou parfois, lorsque ces débris forment des embâcles importants, amplifier les inondations localement;
- Hausse de l'infiltration des eaux dans le sol.

Drainage

Le drainage agricole est une pratique établie sur tous les territoires agricoles. L'objectif visé par le drainage était d'éviter la stagnation de l'eau du ruissellement dans les zones de très faibles pentes afin d'améliorer la perméabilité des sols et rendre ces zones propices à l'agriculture. Cette pratique a entraîné trois impacts importants :

- 1) Du point de vue hydrologique, l'eau, qui était jadis stockée dans ces zones à très faibles pentes, est directement acheminée au chenal principal contribuant ainsi à la hausse des débits de crues en raison de la hausse de la densité de drainage.
- 2) Du point de vue hydrologique, l'assèchement des milieux humides par le drainage a réduit la quantité d'eau infiltrée dans le sol. Il en résulte ainsi une diminution de la recharge des nappes et, conséquemment, des débits d'étiage. À ce propos, Muma (2008) avait démontré que tous les bassins versants agricoles au Québec étaient caractérisés par des débits minimums estivaux plus faibles que ceux des bassins versants forestiers.
- 3) Du point de vue morphologique, l'amplification des débits de crues favoriserait l'érosion des berges. De plus, l'assèchement des milieux humides par le drainage aurait provoqué une hausse de la charge en suspension dans les rivières en raison du fait que ces milieux humides servaient de zone de sédimentation.

1.4.2 Incidences sur la morphologie des chenaux

Les nouvelles conditions d'écoulement ainsi créées par les changements d'utilisation du sol influent sur les apports en sédiments. Tel que vu au chapitre I sur la dynamique fluviale (Notion de dynamique fluviale et morphologie), le transport de sédiments oriente directement les modifications morphologiques du lit mobile et du chenal. Cependant, la réponse du chenal, soit le degré et la direction des changements de largeur, profondeur ou composition, varie avec la magnitude relative des changements d'apports en sédiments et en eau (Clark et Wilcock, 2000). Poff *et al.*, (2006) associent la présence de l'agriculture dans un bassin versant à une augmentation de la variabilité de l'écoulement ainsi qu'à une hausse de la fréquence de conditions sévères (« Flashiness »). Ces phénomènes sont généralement associés à une diminution de la stabilité des berges ou en augmentent le risque. Des vitesses de pointes relativement petites, mais fréquentes peuvent inciter au prolongement des périodes de

retrait des berges, de la migration des chenaux et apportent une importante quantité de sédiments fins. Ces mêmes auteurs indiquent que plusieurs réponses morphologiques sont associées à un accroissement de l'intensité des débits de pointes, notamment un élargissement du chenal, la baisse de la profondeur du chenal et la dégradation de l'habitat physique. L'érosion des berges, le comblement du lit par l'apport important en sédiments de même que la création de bancs centraux est en cause de l'élargissement du chenal. Keesstra *et al.* (2005) rapportent que le reboisement et la hausse des friches dans la rivière Dragonja (Slovénie) s'associent à l'inverse à une réduction de la largeur du chenal. Quant à Assani *et al.* (2003), ils ont attribué l'élargissement du chenal de la rivière Warche en amont du réservoir Butgenbach (Belgique) à une diminution dans le temps de la charge en suspension transportée par la rivière en raison de changement d'affectation des sols. En effet, dans le bassin versant de cette rivière, les surfaces cultivées ont cédé la place à des prairies permanentes. Les impacts morphologiques induits par ce type de changement d'affectation des sols à l'origine de la diminution de la quantité de la charge en suspension transportée par une rivière sont d'ailleurs prédits par les équations de Schumm (1969).

Il existe cependant encore peu d'études relatives à l'incidence directe de l'agriculture sur la morphologie (Clark et Wilcock, 2000; Durocher et Roy, 1986; Hooke, 2006 ; Keesstra *et al.*, 2005; Leduc et Roy, 1990; Urban et Rhoads, 2003). Il est donc difficile de généraliser le phénomène, d'autant plus qu'un ensemble de facteurs connexes influent sur les modifications morphologiques du chenal : changements climatiques, alternance des périodes sèches et humides, présence d'urbanisation et de coupes forestières dans le bassin versant, densification du réseau de drainage des terres par des réseaux souterrains et les fossés agricoles, etc. Par contre, les impacts hydrologiques de l'agriculture nous permettent du moins d'extrapoler ou de supposer un ensemble de répercussions morphologiques.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

2.1 Site à l'étude

2.1.1 Choix de la zone étudiée

Comme le champ de recherche et l'étude se penchent essentiellement sur des cours d'eau situés sur la rive Nord du Saint-Laurent, plus précisément, sur la couronne nord du lac Saint-Pierre, nous avons donc sélectionné une rivière située dans le bassin versant de la rivière Maskinongé. Celui-ci touche simultanément les régions de la Mauricie et de Lanaudière et sa confluence avec le fleuve Saint-Laurent se trouve dans la municipalité de Maskinongé. Le bassin versant de la rivière Maskinongé draine 1105 km² de territoire, prenant sa source dans les Laurentides et se jetant dans le lac Saint-Pierre après avoir traversé les basses plaines du Saint-Laurent.

Afin d'étudier spécifiquement les impacts du reboisement, un tributaire de la rivière Maskinongé a été sélectionné, la rivière Matambin. D'une superficie de 99 km², son bassin versant (figure 2.1) s'écoule essentiellement dans la municipalité de St-Damien et le tronçon principal se jette dans le lac Maskinongé, dans la municipalité de Saint-Gabriel-de-Brandon. Il s'agit d'une rivière sinueuse s'écoulant en grande partie au milieu de terres à usage agricole. Sa petite superficie, sa sinuosité et la présence importante de terres agricoles (pas de périmètre urbain majeur et de barrage importants) constituent les deux principales raisons ayant conduit au choix de cette rivière. En raison de la présence forestière à l'amont de la rivière (difficulté d'interprétation des berges) et l'absence de certaines séries de photographies aériennes anciennes sur certaines portions du bassin versant, la partie aval sera étudiée ici. Un cadre d'étude (figure 2.1) a donc été créé afin d'intégrer l'espace couvert par l'ensemble des photographies aériennes et correspondant essentiellement à la zone agricole du bassin.

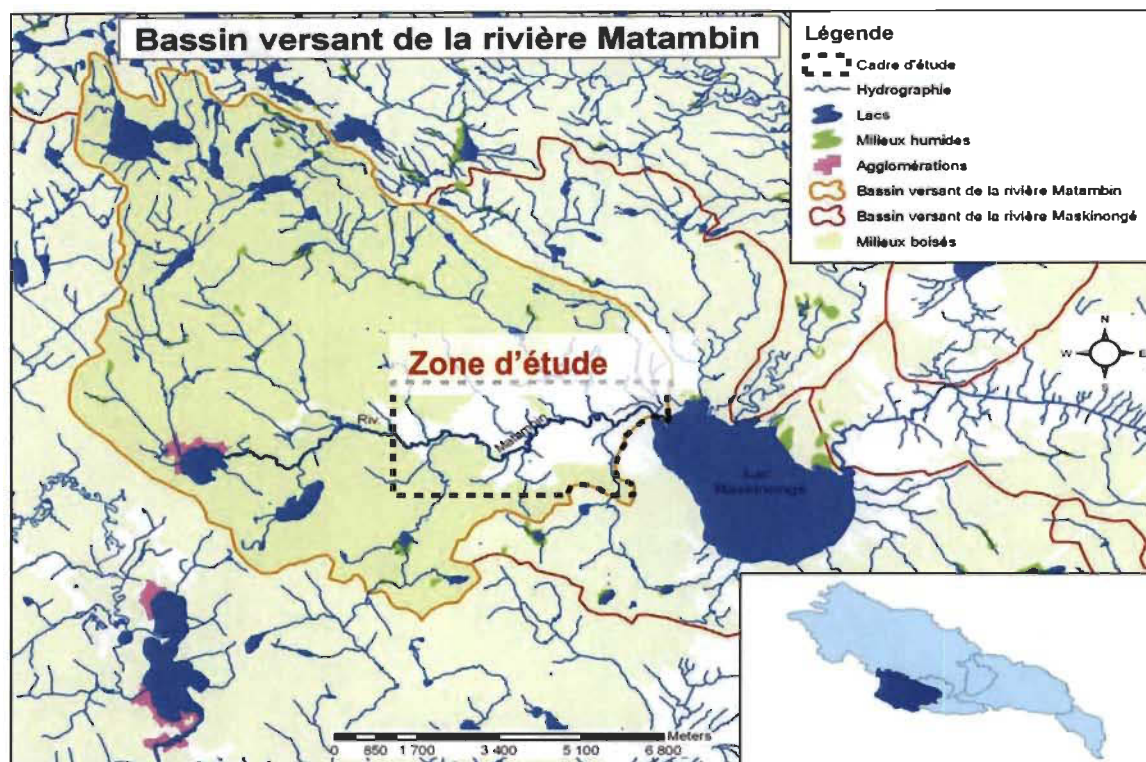


Figure 2.1 : Bassin versant de la rivière Matambin et localisation de la portion étudiée.

2.1.2 Portrait du bassin versant de la rivière Matambin

Hydrographie

Le territoire comprend plusieurs lacs, dont cinq lacs importants, dont la superficie varie de 0,23 km² (lac Migué) à 1,21 km² (lac Blanc). On retrouve également le lac Quesnel (0,37 km²), le lac Corbeau (0,48 km²) et finalement, le lac Matambin (0,60 km²), situé à la tête (amont) de la rivière Matambin. La figure 2.1 présente le territoire du bassin versant.

Topographie

Le bassin versant possède une topographie variant de 135 à 500 mètres (voir le modèle d'élévation numérique) et se situe dans la province naturelle des Laurentides méridionales. Le cadre étudié s'inscrit dans une topographie variant de 135 à 350 mètres d'altitude.

Sédimentologie

La rivière Matambin s'écoule dans les alluvions indifférenciées d'origine glaciaire et fluvio-glaciaire, passant ensuite par des dépôts lacustro-marins vers l'aval et termine sa course dans des alluvions marines et deltaïques ainsi que des alluvions indifférenciées. La rivière Matambin s'écoule donc dans des dépôts constitués principalement par des sédiments argileux, limoneux et sableux.

Climat

La région étudiée s'inscrit dans un climat de type continental humide, caractérisé par des étés chauds (particulièrement en juillet) et des hivers froids, de même que par des précipitations abondantes, s'étalant entre 800 et 1359 mm.

Usage du sol

Les forêts constituent la majorité du territoire du bassin versant de la rivière Matambin, soit 81 % environ. On parle principalement de forêts mixtes et de feuillus. Il existe peu d'exploitation forestière sur le territoire. Selon le portrait du bassin versant de la rivière Matambin (AGIR, 2008), entre 2000 et 2005, aucun hectare en forêts n'a été coupé dans le sous-bassin et aucune coupe ne serait prévue pour la période 2008-2013. Entre 2000 et 2006, les travaux de drainage forestier constituaient 0,4 km² dans la municipalité de St-Damien et aucun n'a été effectué dans les municipalités de St-Gabriel-de-Brandon et St-Jean-de-Matha.

Dans le milieu agricole, 64 % des productions végétales sont en cultures pérennes (473 ha en foin) et 36 % sont des cultures annuelles : céréales (103 ha), maïs (68 ha), horticulture (11 ha) et petits fruits (2 ha).

2.2 Source et traitement des données

2.2.1 Données hydriques

En l'absence de station de jaugeage des débits sur la rivière étudiée, la station sélectionnée la plus rapprochée (station 052601) se situe sur la rivière Maskinongé, au pont du Canadian National (CN) près de la localité de Ste-Ursule (1030 km²). Les débits sont mesurés quotidiennement à cette station, située environ 20 km de la confluence de la rivière Matambin et Maskinongé, depuis 1925. Toutefois, il n'existe pas de données des débits pendant la période 1973 à 1978. Pour combler cette lacune, on a analysé aussi les données des débits mesurés à la station de Joliette dans le bassin versant de la rivière L'Assomption. À Joliette, la superficie de la rivière L'Assomption est de 1390 km². Cette superficie est comparable à celle de la rivière Maskinongé à la station de Ste-Ursule. De plus, les deux rivières prennent naissance dans le Bouclier Canadien et drainent les basses Terres de Saint-Laurent avant de se jeter dans le fleuve Saint-Laurent. Par conséquent, leurs bassins versants présentent des caractéristiques climatiques et physiographiques comparables. À Joliette, les mesures des débits remontent à 1922, trois ans avant celles des débits de la rivière Maskinongé. Les données hydriques historiques journalières et mensuelles de deux rivières (Maskinongé et L'Assomption) nous ont été fournies par le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ).

2.2.2 Fichiers

Les fichiers numériques en format shapefile utilisés pour le présent projet (hypsométrie, hydrographie, surfaces boisées, etc.) proviennent de la Base de Donnée Topographique du Québec (BDTQ) à l'échelle 1/20 000 et sont projetés en UTM NAD 83. Hors, cette projection crée certains problèmes lors de la manipulation dans le logiciel PCI Géomatica. Chacun des fichiers utilisés a donc été reprojeté en UTM WGS 1984 afin d'assurer une bonne compatibilité avec le logiciel.

2.2.3 Photographies aériennes et orthophotographies

Les photos aériennes ont été acquises à la Cartothèque de l'Université du Québec à Trois-Rivières, la Photothèque nationale de l'air de Ressource Naturelle Canada ainsi que la Géomathèque du ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec. À l'exception de l'année 2008 ayant été déjà orthorectifiées, les photos aériennes des autres années ont été numérisées en format 8 bit, en noir et blanc pour une résolution de 600 DPI.

2.3 Analyse des photographies aériennes

2.3.1 Choix des photographies aériennes

Nous avons pu obtenir des photographies aériennes pour plusieurs décennies depuis 1930 jusqu'à maintenant. Ont été exclues la décennie 1940, période de guerre peu pourvue en couverture aérienne, la décennie 1950, dont l'échelle des photographies aériennes était inadéquate (l'erreur du tracé des berges aurait été trop élevé) et la décennie 1980, puisque la période de changements agricoles majeur étudiée précède cette décennie. Celle-ci est donc superflue dans l'analyse. Nous avons tenté de réunir des photographies aériennes dont la date de prise de vue et/ou les conditions hydrologiques étaient similaires, cependant, la disponibilité des photos nous permettait parfois difficilement d'appliquer cette règle. Par contre, dans l'optique où le tracé des rives s'est effectué au niveau du débit à plein bord, cela ne pose pas de réel problème si l'on considère qu'il ne s'agit pas de périodes de prise de vue où ces débits dépassent les débits à pleins bords. Le tableau 2.1 présente quelques caractéristiques des photographies aériennes sélectionnées.

En raison d'une faible couverture (deux photos seulement ne couvrant que l'aval), les photographies de 1975 n'ont été utilisées que pour l'évaluation de l'utilisation du sol en zone agricole.

Tableau 2.1
Caractéristiques des photographies aériennes utilisées

Date		Échelle	Rouleau	Photo	Longueur focale	Débit	
<i>Année</i>	<i>Date</i>					<i>Débit du jour</i>	<i>Moyenne mensuelle</i>
1935	8 octobre 1935	1/15 000	A5259	1-3-5-7-9	203.2	8.5	6.58
1964	2 sept. 1964	1/15 840	Q64545	45 à 53	152.55	2.38	1.66
1975	30 juin 1975	1/15 000	Q75330	171-172	151.28	nd	nd
1997	23 juillet 1997	1/15 000	HMQ97138	227 à 236	153.25	4.83	6.08
2008	12 juin 2008	1/15000	Q08001	65 à 105	100.5	17,54	nd

*n.d. : non disponible.

2.3.2 Géoréférence et orthorectification

À l'aide du logiciel PCI Geomatica, chacune des photographies aériennes a été géoréférencée à l'aide d'un modèle d'élévation numérique (MNE) et sélectionné comme étant le plus représentatif de la réalité. L'orthorectification a été menée à l'aide du logiciel PCI Géomatica. Chacune des photographies aériennes a été géoréférencée, orthorectifiée puis intégrée dans une mosaïque pour chacune des années d'étude.

La géoréférence consiste avant tout à appliquer une coordonnée géographique à chacun des pixels d'une image afin de positionner l'image et les divers éléments dans l'espace géographique. L'orthorectification, quant à elle, permet d'éliminer le maximum de distorsions dans l'image liées à l'axe optique, aux effets du relief et de la projection. Les procédés de géoréférence et d'orthorectification permettent la transformation des photographies aériennes en « orthophotographies » avec lesquelles on peut plus aisément travailler et superposer d'autres fichiers géoréférencés.

Les points de références communs utilisés pour géoréférencer ont été tirés des vecteurs de routes et d'hydrographie ainsi que des orthophotographies d'années plus récentes et déjà orthorectifiées de façon à obtenir une erreur acceptable et la moins élevée possible. Un modèle d'élévation numérique fiable est également nécessaire pour la qualité du géoréférencement.

Des mosaïques ont ensuite été créées à partir de l'ensemble des orthophotos afin de couvrir l'ensemble du territoire touché. La mosaïque consiste en un assemblage des orthophotos d'une même série et permettant de réduire l'effet des limites et superpositions de même que les différences radiométriques pouvant subsister.

Création et validation d'un modèle d'élévation numérique

Divers modèles numériques d'élévation (MNE) ont été créés à l'aide du logiciel ArcGIS (version 9.2). Ceux-ci ont été conçus à partir de diverses fonctions et paramètres et ont tous été testés. Pour chacun d'entre eux, la qualité du résultat était comparée à l'hypsométrie et le modèle le plus concluant et possédant donc l'erreur la plus faible possible a été conservée.

D'abord, les courbes de niveau ont été transformées et exportées en points à l'aide du logiciel Arc GIS. Un certain nombre de points tests ont été tirés du fichier, pour un pourcentage de 1 %. Les valeurs d'altitude ont ensuite été extraites pour chacun de ces points et un nouveau champ « erreur » a été créé dans la base de données du fichier de point créé plus tôt. Le calcul appliqué dans ce nouveau champ était le suivant : Valeur d'altitude du MNE – Valeur d'altitude des courbes de niveau au même point. La moyenne des erreurs était ainsi calculée et la comparaison entre les moyennes des différents MNE testés a permis de sélectionner celui étant le plus près de la réalité. Le plus précis a donc été conservé et utilisé dans le géoréférencement des photographies aériennes (voir section 3.2).

2.4 Analyses hydrologiques

2.4.1 Analyse de la variabilité interannuelle des débits

Dans le cadre de ce travail, pour expliquer l'influence potentielle des débits sur l'évolution morphologique du chenal de la rivière Matambin, deux types de séries saisonnières ont été analysées: la série des débits maximums journaliers saisonniers et les débits moyens journaliers saisonniers. La première série est constituée par des débits

journaliers les plus élevés mesurés chaque saison et chaque année. La seconde série est constituée par des moyennes des débits journaliers de chaque saison et de chaque année. En ce qui concerne la subdivision de l'année en saison, on a adopté la subdivision déjà utilisée par de nombreux auteurs au Québec (p. ex. Assani *et al.*, 2005; Lajoie *et al.*, 2007; Matteau *et al.*, 2009) afin de pouvoir comparer avec nos résultats. Les saisons ont été ainsi définies de la manière suivante : Hiver (de janvier à mars), printemps (d'avril à juin), été (de juillet à septembre) et automne (d'octobre à décembre). Cette subdivision reflète mieux le cycle hydrologique naturel au Québec.

Les deux séries hydrologiques définies précédemment ont été soumises à l'analyse de la variabilité interannuelle des débits. Comme les premières photographies aériennes dont nous disposons ont débuté dans la décennie 1930, les séries hydrologiques analysées ont été constituées à partir de l'année 1930. Rappelons qu'il existe de nombreux tests et méthodes statistiques pour analyser la variabilité des débits (Kundzewicz *et al.*, 2005). Toutefois, les deux tests couramment utilisés en hydrologiques sont le test de Mann-Kendall et la régression linéaire. Toutefois, ces deux tests présentent deux faiblesses.

- Ils ne peuvent pas détecter un changement graduel de la moyenne ou de la variance de la série hydrologique analysée.
- Ils ne peuvent pas déterminer avec précision la date de ce changement.

Pour pallier ces deux faiblesses, on a appliqué la méthode de Lombard (Lombard, 1987).

Supposons une série d'observations, dénotées X_1, \dots, X_n , où X_i est l'observation au temps $T = i$. Ces valeurs sont supposées indépendantes. Une question intéressante consiste à vérifier si la moyenne de cette série a changé. Si μ_i est la moyenne théorique de X_i , alors un scénario possible est donné par le « smooth-change model » de Lombard, c'est-à-dire :

$$\mu_i = \begin{cases} \theta_1 & \text{if } 1 \leq i \leq T_1; \\ \theta_1 + \frac{(i - T_1)(\theta_2 - \theta_1)}{T_2 - T_1} & \text{if } T_1 < i \leq T_2; \\ \theta_2 & \text{if } T_2 < i \leq n. \end{cases} \quad (1)$$

Ainsi, la moyenne passe graduellement de θ_1 à θ_2 entre les temps T_1 et T_2 . Un cas particulier est la rupture abrupte, lorsque $T_2 = T_1 + 1$.

Pour tester formellement si la moyenne d'une série est stable ou suit le modèle (1), on peut utiliser la procédure statistique de Lombard (1987). À cette fin, soit R_i , le rang de X_i parmi X_1, \dots, X_n . Prenons la fonction score de Wilcoxon, c'est-à-dire $\phi(u) = 2u - 1$, et définissons le score de X_i par

$$Z_i = \frac{1}{\sigma_\phi} \left\{ \phi \left(\frac{R_i}{n+1} \right) - \bar{\phi} \right\}, \quad i \in \{1, \dots, n\}, \quad (2)$$

où

$$\phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi \left(\frac{i}{n+1} \right) \quad \text{et} \quad \sigma_\phi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \phi \frac{i}{n+1} - \bar{\phi} \right\}^2 \quad (3)$$

La statistique de test de Lombard est

$$S_n = \frac{1}{n} \sum_{T_1=1}^{n-1} \sum_{T_2=T_1+1}^n L_{T_1 T_2}^2, \quad (4)$$

où

$$L_{T_1 T_2} = \sum_{j=T_1+1}^{T_2} \sum_{i=1}^j Z_i \quad (5)$$

Au niveau de signification de 5 %, si $S_n > 0,0403$, on conclut que la moyenne de la série a changé de façon significative selon un modèle de la forme (1). La valeur de

0.0403 correspond au seuil critique de signification de la méthode de Lombard. À noter que le test adéquat pour détecter tous les types de changements induits par le modèle (1), incluant les changements abrupts. Une étude complète sur la puissance et la robustesse de S_n et de cinq autres statistiques de test a été effectuée par Quessy *et al.* (2011).

2.5 Analyse de l'évolution temporelle de l'usage des sols

À l'aide des fichiers cartographiques sur l'utilisation du sol déjà disponibles, les milieux boisés ont été retracés à l'aide du logiciel ArcGIS (version 9.2), permettant d'isoler le milieu agricole et d'en évaluer ainsi l'évolution dans le temps. Les limites des surfaces reboisées sur les photographies prises en différentes périodes ont été superposées à l'intérieur du cadre d'étude.

2.6 Analyses morphologiques

Les mosaïques d'orthophotographies créées ont permis l'analyse du chenal des rivières et de l'utilisation du sol. Les caractéristiques morphologiques visées ici sont donc la largeur du chenal, la sinuosité du tronçon ainsi que la présence et caractéristiques des méandres abandonnés (bras-morts). L'étude de l'évolution du chenal (largeur et sinuosité) permettra de comparer les données morphométriques à celle de l'évolution de l'utilisation des sols (reboisement).

2.6.1 Largeur

Afin d'en faire la comparaison, le chenal a été tracé à l'aide du logiciel Arc GIS sur les mosaïques créées, et ce pour l'ensemble des périodes d'études. Laurencelle (2008) a élaboré une méthode intéressante permettant de tracer les berges et le chenal et c'est celle-ci qui a été utilisée.

1. Chaque rive a été tracée avec un très grand nombre de points (figure 2.2). La délimitation nécessite une évaluation visuelle du haut du talus. Bien que la végétation puisse rendre plus difficile cette délimitation, le haut du talus était généralement visible en raison de la faible largeur voir l'absence des bandes riveraines.



Figure 2.2 : Traçage des rives.

2. Après avoir accordé des valeurs spécifiques de 1 pour les segments de rive gauche et de 3 pour les segments de rive droite, une ligne médiane (figure 2.3) a ainsi pu être créée pour chaque année d'étude, correspondant donc à une valeur médiane de 2.



Figure 2.3 : Création d'une ligne médiane.

3. Des points de référence ont été attribués à un pas régulier de 10 m le long de la médiane (figure 2.4).



Figure 2.4 : Attribution des points de référence.

4. Des perpendiculaires, ayant comme point d'attache chaque point de référence, ont été ajoutées, corrigées et coupées avec le fichier de berges, permettant ainsi d'obtenir les mesures de la largeur du cours d'eau de façon régulière (figure 2.5).



Figure 2.5 : Génération, coupe et ajustement des perpendiculaires.

5. Un polygone généré à partir des lignes perpendiculaires obtenues nous a permis d'effectuer une évaluation visuelle de l'évolution de la largeur du chenal et des méandres (figure 2.6).



Figure 2.6 : Création du polygone de chenal.

Afin de vérifier l'erreur induite par l'évaluation visuelle effectuée pour le traçage de berges, une quinzaine de sections ont été retracées pour chacune des années et ce dans différentes conditions de qualité visuelle. Les résultats étaient comparés aux largeurs tracées précédemment et l'erreur obtenue correspondait en moyenne à 0,5 m environ. Il est important de noter que le tracé des berges de l'année 1964 n'a pas été fait sur la même longueur que pour les années 1935, 1997 et 2008. La trop grande difficulté d'interprétation à l'amont du bassin pour l'orthophotographie 1964 (boisés, netteté de l'image) rendait ardu le tracé des berges et l'erreur générée aurait été trop élevée. Cependant, nous avons tenu compte de cette différence de longueurs entre les années dans la comparaison des largeurs moyennes à plein bord. De fait, la différence de

longueur ne peut pas expliquer la différence de largeur dans la mesure où la comparaison de la largeur a été effectuée sur le même tronçon du chenal sur une longueur représentant plus de 70 % de la longueur total de ce tronçon.

2.6.2 Sinuosité

La sinuosité de la rivière et des méandres a été établie pour l'ensemble des périodes d'étude. La sinuosité (S) globale de la rivière est évaluée selon la formule suivante (Stølum, 1996; Bravard et Petit, 2000) :

$$S = \frac{L}{l} \quad (6)$$

L étant la longueur réelle de la rivière entre deux points et l la longueur la plus courte (à vol d'oiseau) entre ces mêmes points. Une rivière entièrement droite possèdera une valeur de sinuosité de 1.

2.6.3 Analyses statistiques sur les données morphologiques

Certains tests statistiques ont été appliqués sur les données de largeur afin d'assurer la signification des résultats obtenus et d'évaluer les liens existant entre les différentes années.

En premier lieu, une analyse de variance (ANOVA) a été appliquée sur les moyennes de largeurs des différentes années d'étude. L'ANOVA permet de comparer la moyenne de plusieurs groupes (deux et plus) et ainsi de définir si la différence des moyennes est significative (variance).

Le test de Tukey (test de la différence par paires) permettra par la suite de déterminer lesquelles de ces moyennes sont significativement différentes entre elles. Ce test consiste à comparer chaque paire possible de moyennes afin d'établir lesquelles

possèdent des différences significatives. Pour ce faire, une différence critique ou minimale est calculée et la différence entre chaque paire de moyenne est comparée à cette valeur critique. Les valeurs supérieures à la valeur critique sont donc significativement différentes.

2.6.4 Méandres abandonnés

Les méandres résiduels qui ont été recoupés ont tous été comblés. Les caractéristiques morphométriques n'ont donc pas pu être calculées.

CHAPITRE III

RÉSULTATS

3.1 Variabilité interannuelle des débits

3.1.1 Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums et moyens journaliers saisonniers des rivières Maskinongé et de L'Assomption

Rappelons que les débits de la rivière Maskinongé n'ont pas été mesurés pendant la période 1973 à 1978. Pour combler cette lacune, on a corrélé les débits de cette rivière à ceux de la rivière L'Assomption la plus proche. Les coefficients de corrélation calculés entre les débits de deux rivières sont consignés dans le tableau 3.1. Il ressort de ce tableau que tous les coefficients de corrélation sont statistiquement significatifs au seuil de 1 %. Les débits de deux rivières sont fortement corrélés en automne, en hiver et en été. Cette forte corrélation nous permet de conclure que la variabilité interannuelle des débits est similaire dans les deux bassins versants.

Tableau 3.1

Coefficients de corrélation calculés entre les débits maximums et moyens journaliers des rivières Maskinongé et L'Assomption (1930-2008)

	Hiver	Printemps	Été	Automne
Débits maximums journaliers	0,8233	0,5815	0,8327	0,9191
Débits moyens journaliers	0,8012	0,7477	0,8483	0,9616

Tous les coefficients de corrélation sont statistiquement significatifs au seuil de 1 %.

3.1.2 Analyse de la variabilité interannuelle des débits maximums et moyens journaliers des rivières Maskinongé et L'Assomption au moyen de la méthode de Lombard

Les valeurs de la statistique S_n de la méthode de Lombard sont consignées dans le tableau 3.2. Seuls les débits maximums journaliers en hiver ont significativement changé pour les deux rivières. Toutefois, dans le cas de la rivière Maskinongé, les débits moyens journaliers hivernaux ont aussi significativement augmenté. Cette hausse, qui est abrupte pour les deux rivières, est survenue au début de la décennie 1970. Aucun changement significatif n'a été observé durant les trois autres saisons. Néanmoins, il est important de mentionner que malgré cette absence de changement de la moyenne de la magnitude des débits maximums, on a observé, dans la rivière L'Assomption, une fréquence plus élevée des débits de forte magnitude après 1970 (tableau 3.3) durant les quatre saisons, en particulier au printemps. Les figures 3.1 à 3.4 présentent la comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums journaliers pour chacune des quatre saisons et ce, pour les rivières L'Assomption et Maskinongé. On retrouve, à l'annexe A, les figures A1 à A4 représentant la comparaison de la variabilité interannuelle, mais cette fois, pour les débits moyens journaliers.

Tableau 3.2

Variabilité interannuelle des débits maximums et moyens journaliers
de la rivière L'Assomption à la station de Joliette (1930-2008)
Valeurs de la statistique S_n de Lombard pour les moyennes des séries

Saisons	Rivière Maskinongé			Rivière L'Assomption		
	S_n	$T1$	$T2$	S_n	$T1$	$T2$
Débits maximums journaliers						
Hiver	0,0608	1970	1971	0,0827	1971	1972
Printemps	0,0119	-	-	0,0249	-	-
Été	0,0302	-	-	0,0058	-	-
Automne	0,041	-	-	0,0337	-	-
Débits moyens journaliers						
Hiver	0,0525	1970	1971	0,0024	-	-
Printemps	0,0345	-	-	0,0014	-	-
Été	0,0149	-	-	0,0339	-	-
Automne	0,0353	-	-	0,0330	-	-

Les valeurs de $S_n > 0,0403$ statistiquement significatives au seuil de 5 % apparaissent en gras. $T1$ et $T2$ sont les années de changement de la moyenne.

Tableau 3.3

Comparaison de la fréquence des forts débits maximums journaliers de
la rivière L'Assomption à la station de Joliette avant et après 1964

Saison	1935-1964	1964-1994
Hiver (100 m ³ /s)	2	4
Printemps (250 m ³ /s)	2	5
Été (100 m ³ /s)	0	2
Automne (150 m ³ /s)	1	2

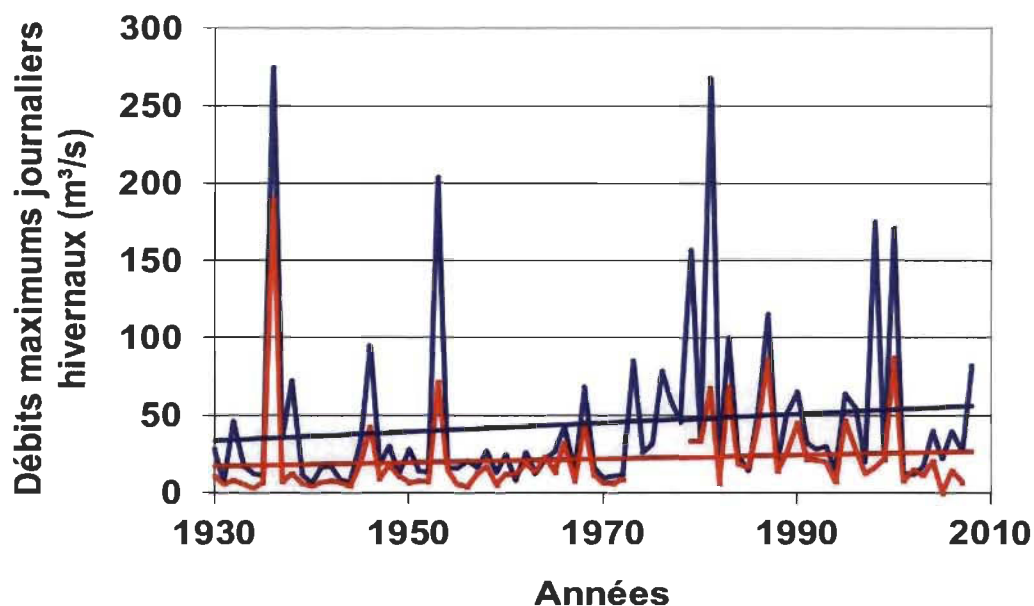


Figure 3.1 : Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums journaliers hivernaux des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge).

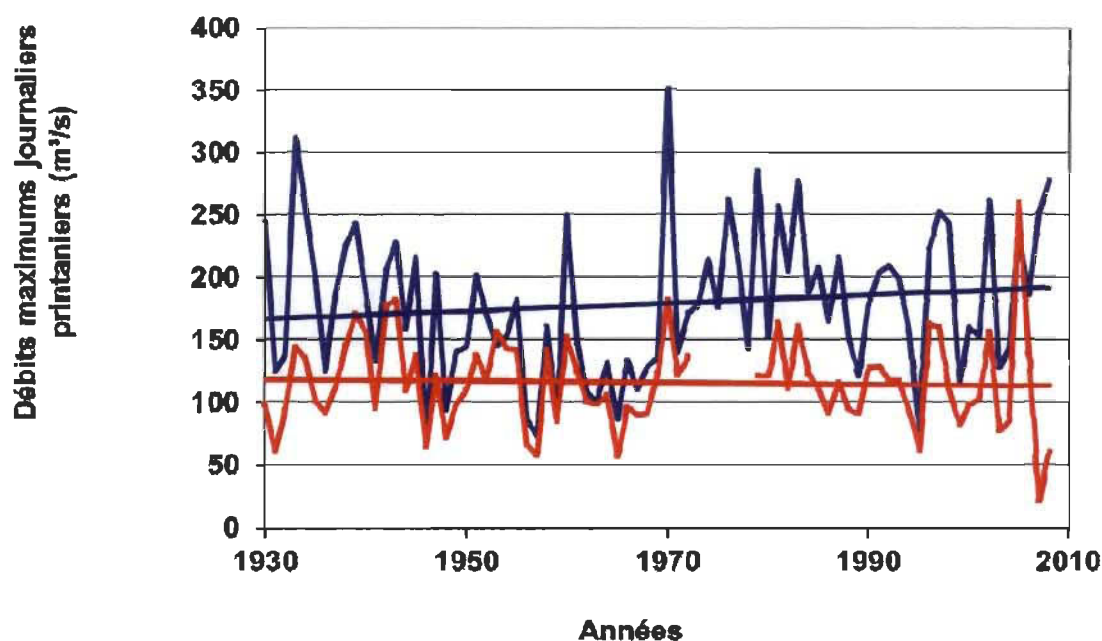


Figure 3.2 : Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums journaliers printaniers des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge).

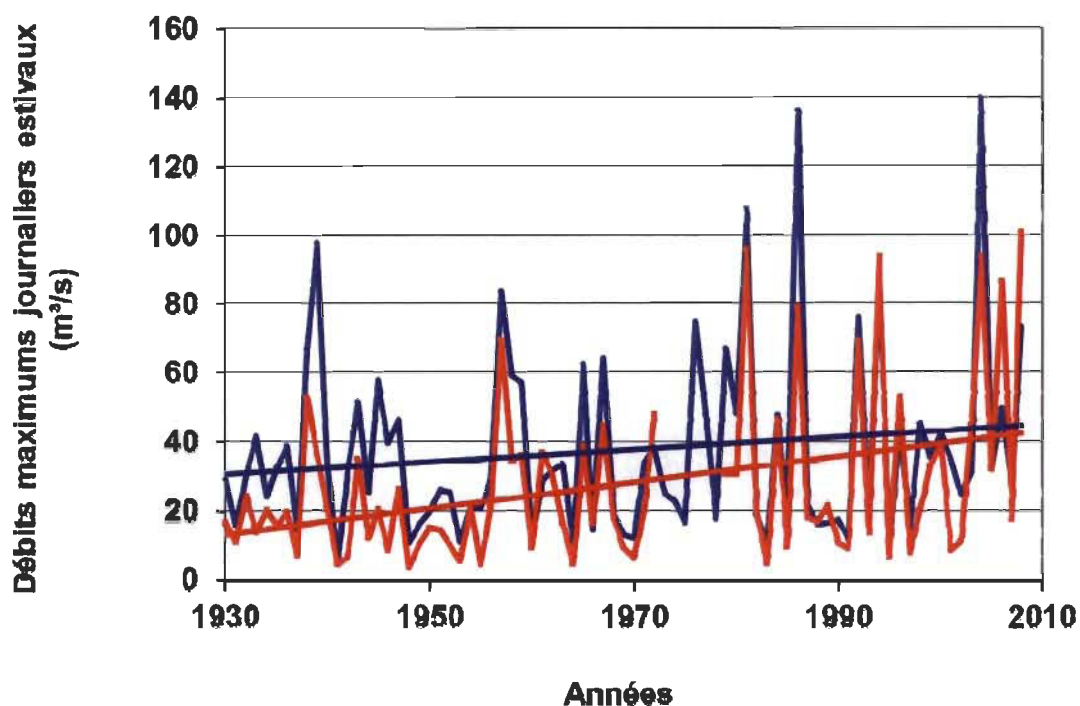


Figure 3.3 : Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums journaliers estivaux des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge).

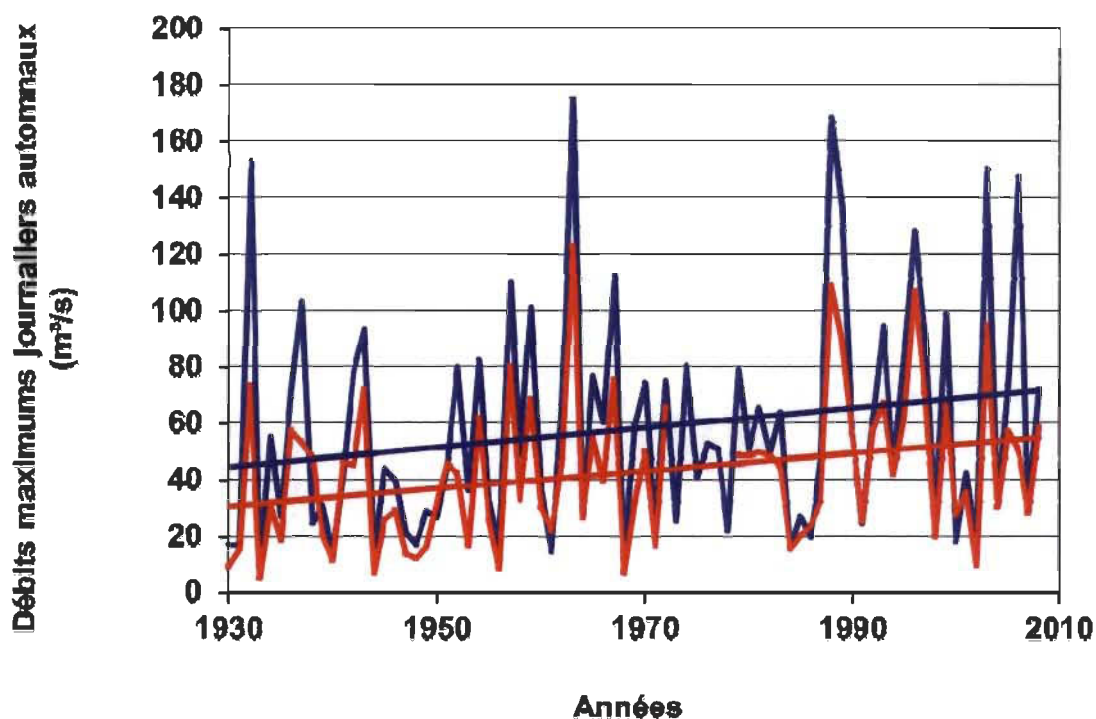


Figure 3.4 : Comparaison de la variabilité interannuelle des débits maximums journaliers automnaux des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge).

3.2 Géoréférence et orthorectification

3.2.1 Création d'un MNE

La fonction *Topo to Raster* dans ArcGis a offert un MNE possédant le moins d'erreurs (figure 3.5). Il s'agit d'une méthode d'interpolation impliquant la création d'un MNE dont l'implantation du réseau de drainage dans le calcul en permet la correction (drainage Enforcement). Ainsi, il faut s'assurer de la réorientation du fichier de ligne des cours d'eau afin qu'ils soient orientés dans le sens de l'écoulement (flip) avant de les intégrer dans l'élaboration du MNE. L'erreur finale calculée pour ce MNE a été de -0,7 m (différence par rapport au fichier d'hypsométrie). D'après le modèle obtenu, la plus faible valeur est de 135,83 m et la plus élevée, de 532,30 m.

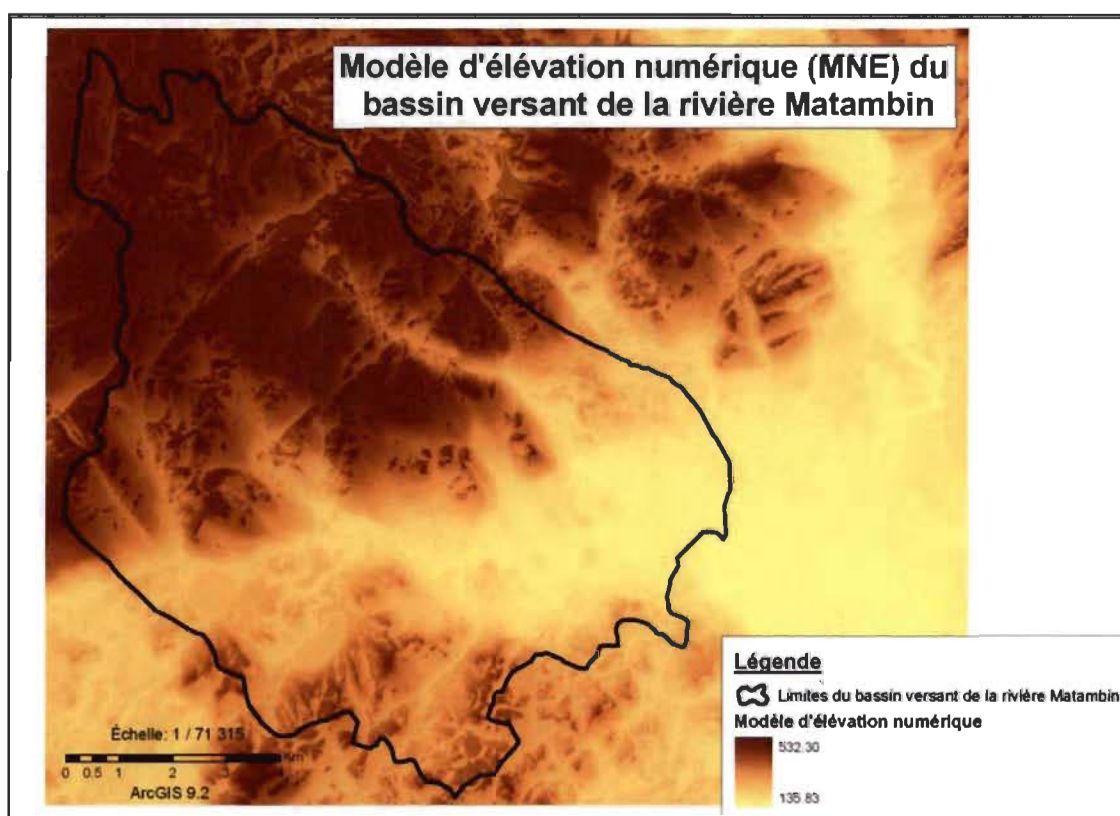


Figure 3.5 : Modèle d'élévation numérique du bassin versant de la rivière Matambin.

3.2.2 Géoréférence des photographies aériennes

Dans les tableaux B1 à B4 présentés à l'annexe B sont consignés les résultats obtenus lors du géoréférencement des photographies aériennes de 1936, 1964, 1975 et 1997, l'année 2008 ayant été déjà géoréférencée et orthorectifiée. Afin d'obtenir le meilleur géoréférencement possible, on a procédé en ordre chronologique inversé des photographies, de la plus récente à la plus ancienne (2008 à 1936). La série de clichés de 2008 étant, à l'origine, déjà géoréférencée et orthorectifiée, son utilisation a réduit les sources d'erreurs. L'erreur la plus faible possible était la cible lors du choix des points de contrôle. En mètres au sol, l'erreur moyenne obtenue fut de 1,61 m pour 1935, 1,17 m pour 1964, 1,56 m pour 1975 et 1,63 m pour 1997.

3.3 Contexte d'usage des sols

3.3.1 Utilisation du sol

En 2008, on note que 81,56 km² des 98,03 km² totaux du bassin versant étaient boisés, soit 83,2 % du territoire. La superficie déboisée est donc de 16,47 km², soit 16,8 %. Les résultats obtenus suite à la numérisation des surfaces boisées (cadre d'étude de 7,81 km²) ont permis de constater que dans la zone agricole étudiée, la proportion en forêts a connu une augmentation significative entre 1935 et 2008, passant de 13,2 % (1,27 km²) en 1935 du territoire étudié à 27,1 % (2,12 km²) en 2008. Elle a donc plus que doublé au travers des ans, au détriment des terres en cultures. Le milieu boisé a augmenté graduellement au fil des ans, mais on note deux augmentations significatives entre 1935 et 1964 (+ 32,37 %) d'une part, et entre 1975 et 1997 (+ 23,92 %), d'autre part (tableau 3.4 et figure 3.6 et 3.7). En pourcentage cumulé, la superficie reboisée est donc passée de 32,37 % en 1964 à 56,27 % en 1997.

Tableau 3.4

Évolution de la superficie en boisés dans le bassin versant de la rivière Matambin, à l'intérieur du cadre d'étude

	Sup. 1935 (km²)	Sup. 1964 (km²)	Sup. 1975 (km²)	Sup. 1997 (km²)	Sup. 2008 (km²)
Total	1,27	1,68	1,71	2,08	2,12
Différence	-	0,41	0,03	0,38	0,03
% boisé	16,23	21,49	21,86	26,71	27,13
% d'aug	-	32,37	1,74	22,18	1,57
% cumulé	-	32,37	34,11	56,29	57,86

*Superficie du cadre d'étude : 7.81 km².

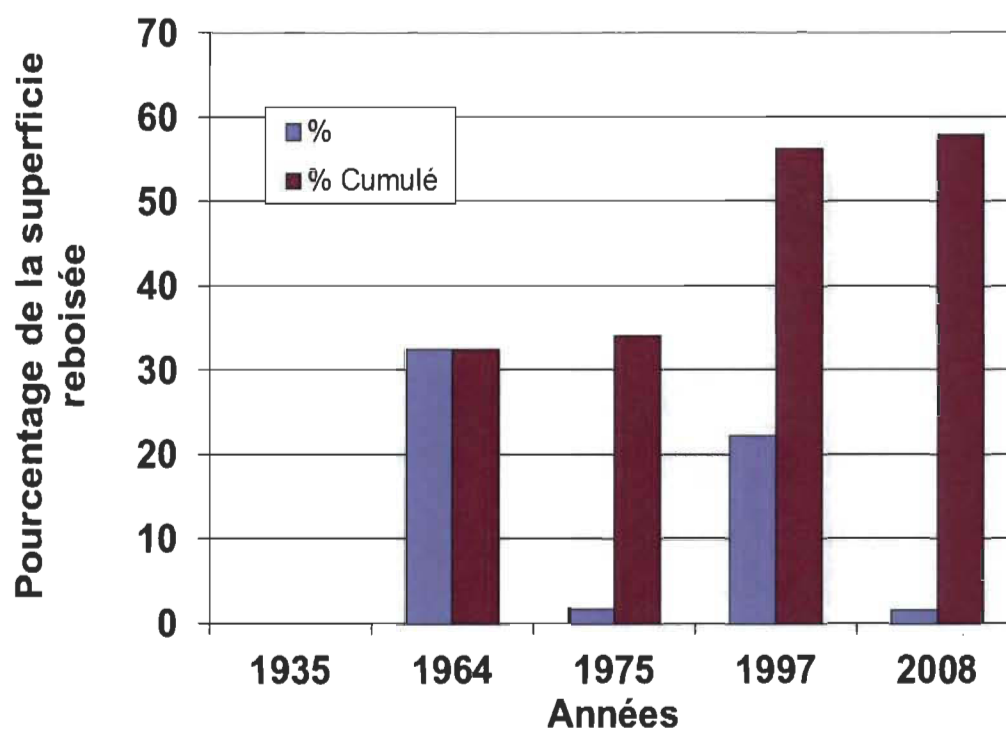


Figure 3.6 : Évolution de la superficie reboisée (en %) dans le territoire d'étude.

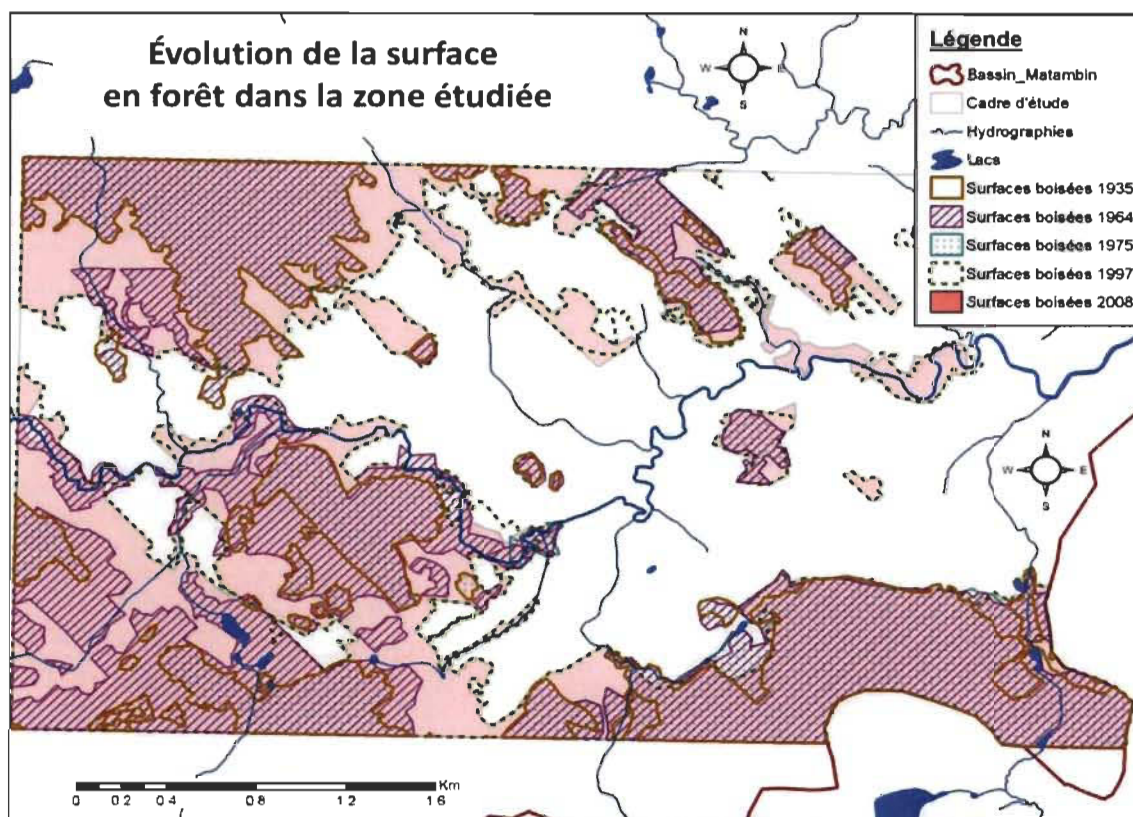


Figure 3.7 : Évolution de la surface en forêt dans la zone étudiée, entre 1935 et 2008.

3.4 Contexte morphologique

3.4.1 Analyse de l'évolution de la largeur et de la sinuosité du chenal

Les valeurs moyennes de la largeur à plein bord et de la sinuosité sont présentées au tableau 3.5. Les résultats de la comparaison de ces valeurs moyennes de la largeur au moyen de la méthode d'ANOVA et du test de Tukey sont consignés respectivement dans les tableaux 3.6 et 3.7. Il ressort de ces tableaux que la largeur moyenne à plein bord diminue d'abord significativement après 1935 (- 21 %) et, ensuite, augmente (+ 10 %) significativement après 1997. Quant à la sinuosité, elle a peu varié dans le temps depuis 1935 (tableau 3.5) malgré le recoupement de quelques méandres par le processus de tangence et de déversement d'origine naturelle ou anthropique.

Tableau 3.5

Évolution de la largeur et de la sinuosité du chenal de la rivière Matambin entre 1935 et 2008

	Largeur		Sinuosité
	Moyenne (m)	Écart type	
1935	16,5 (946)	5,45	1,77
1964	13 (806)	4,63	1,78
1997	13,4 (937)	4,52	1,75
2008	14,3 (935)	4,38	1,74

() = nombre de mesures.

Tableau 3.6

Comparaison des valeurs moyennes de la largeur à pleins bords du chenal de la rivière Matambin entre 1935 et 2008 au moyen de la méthode d'analyse de variance à un seul critère de classification

Sources	SM	DL	CM	F	p
Années	6478,771	3	2159,590	94,956	0.000
Erreur	82307,529	3619	22,743		

SM = Somme des carrés; DL = nombre de degrés de liberté; F = Valeur calculée du test de Fisher-Snedecor; p = seuil critique. Le test est statistiquement significatif lorsque la valeur de $p < 0,05$.

Tableau 3.7

Comparaison des valeurs moyennes de la largeur à pleins bords du chenal de la rivière Matambin entre 1935 et 2008 au moyen de la méthode de Tukey
Matrice de probabilité

	1935	1964	1997	2008
1935	1			
1964	0,000	1		
1997	0,000	0,217	1	
2008	0,000	0,001	0,000	1

Les valeurs de probabilité $< 0,05$ sont statistiquement significatives au seuil de 5 %.

La figure 3.8 représente la localisation des différents méandres recoupés sur la rivière Matambin. Ceux-ci sont présentés dans les pages suivantes en image détaillée (figures 3.8 à 3.13). Chacun des méandres est représenté par un chiffre, de 1 à 6, dans l'ordre croissant de l'aval vers l'amont.

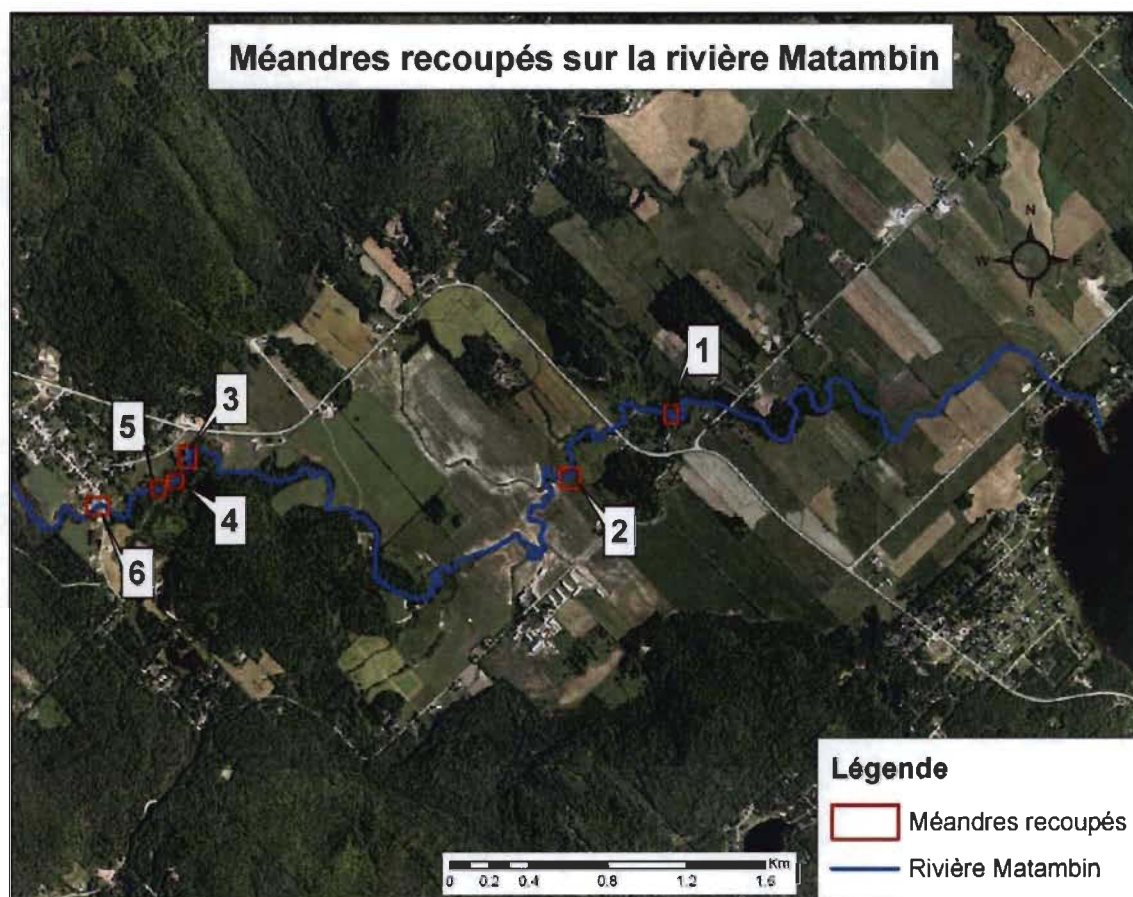


Figure 3.8 : Méandres recoupés sur la rivière Matambin.

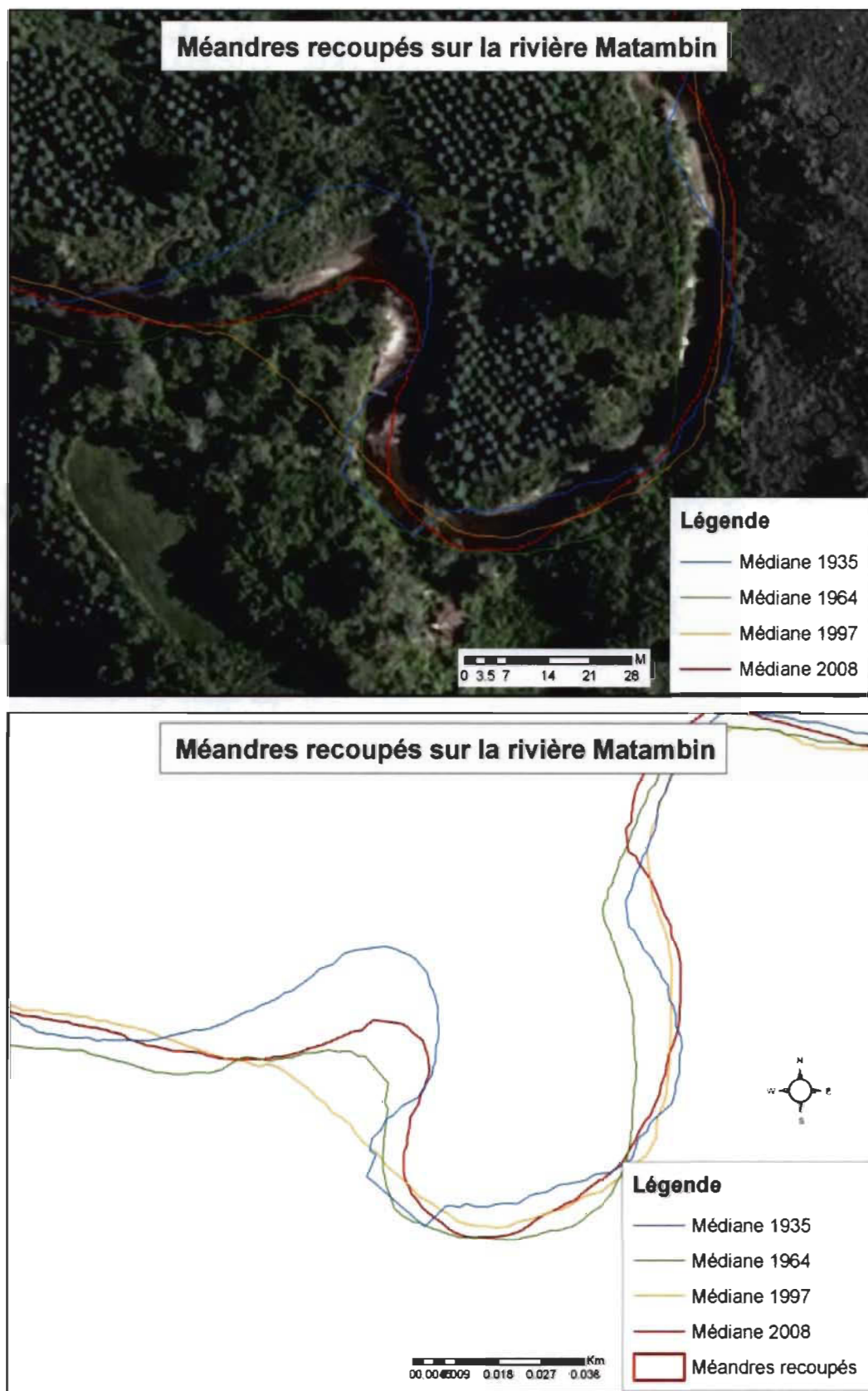


Figure 3.9 : Méandre recoupé 1.

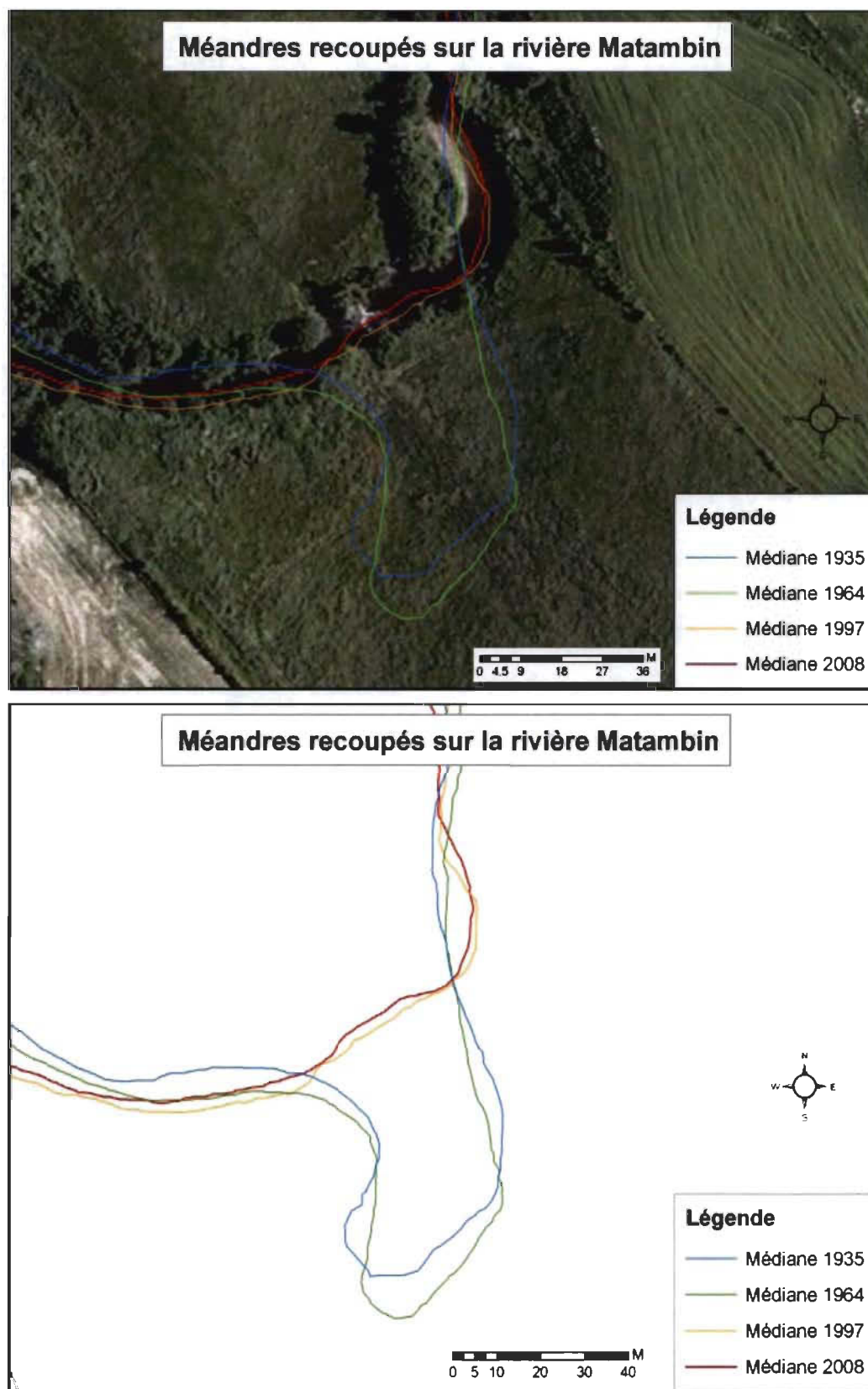


Figure 3.10 : Méandre recoupé 2.

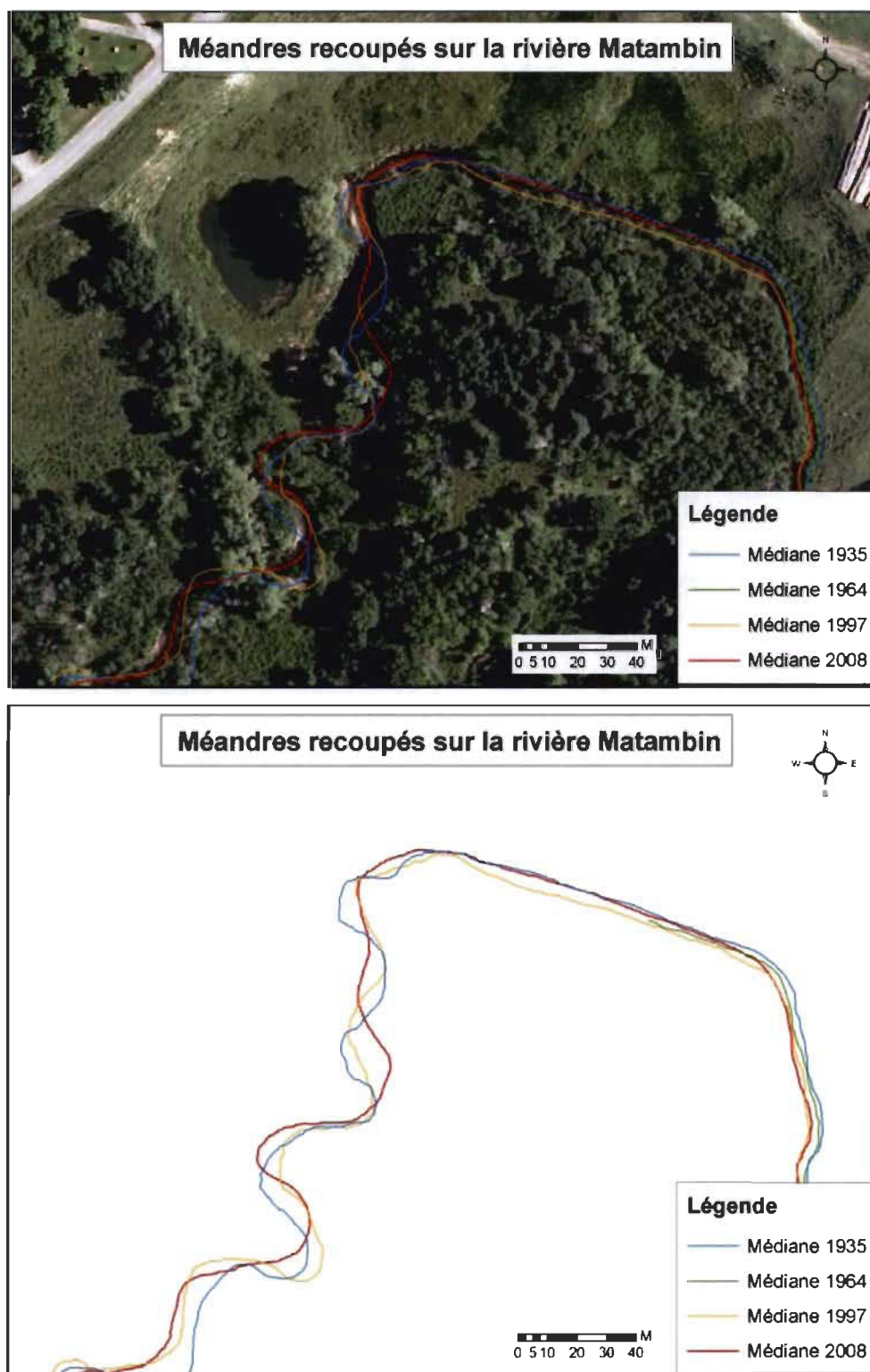


Figure 3.11 : Méandre recoupé 3.

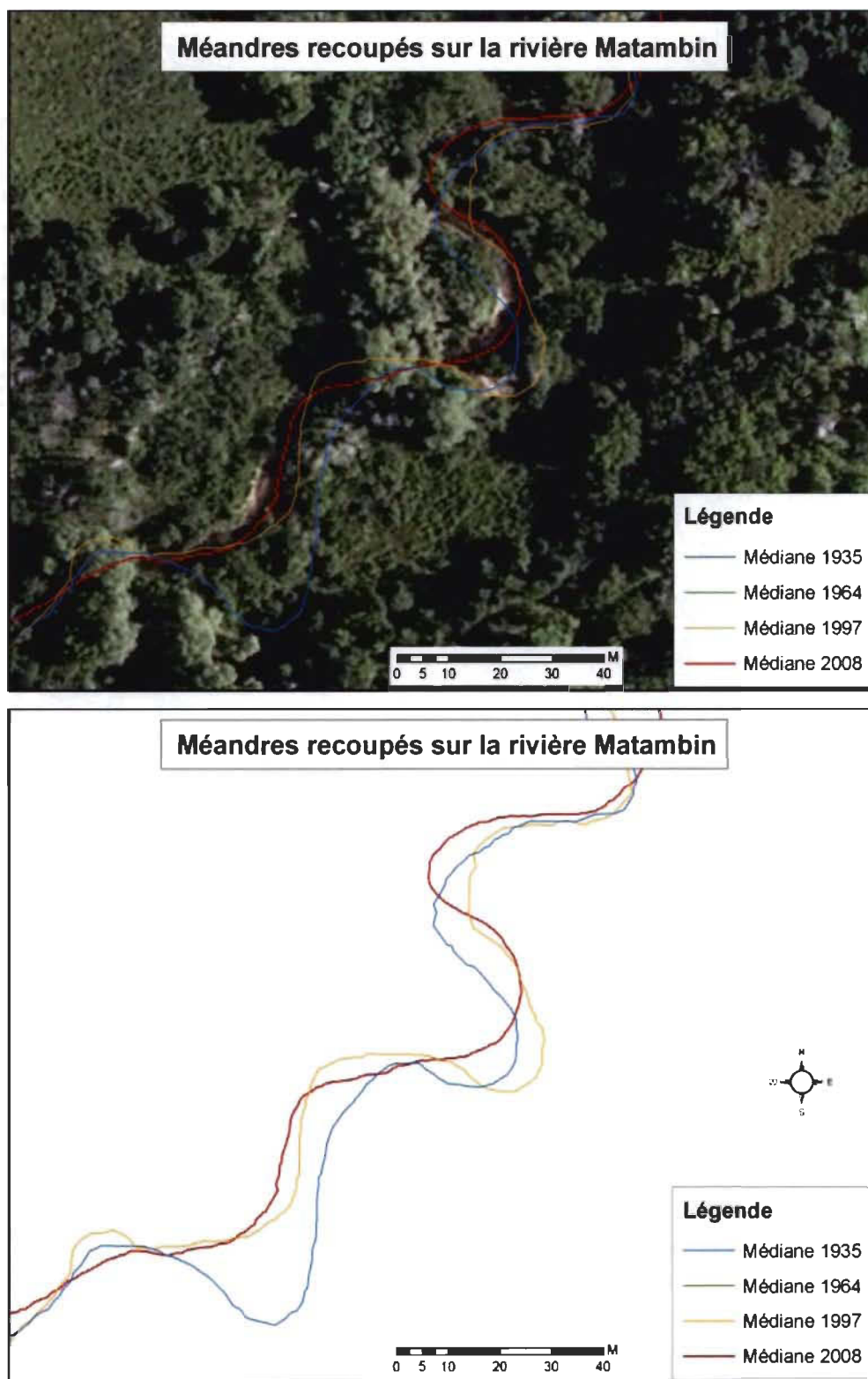


Figure 3.12 : Méandres recoupés 4 et 5.

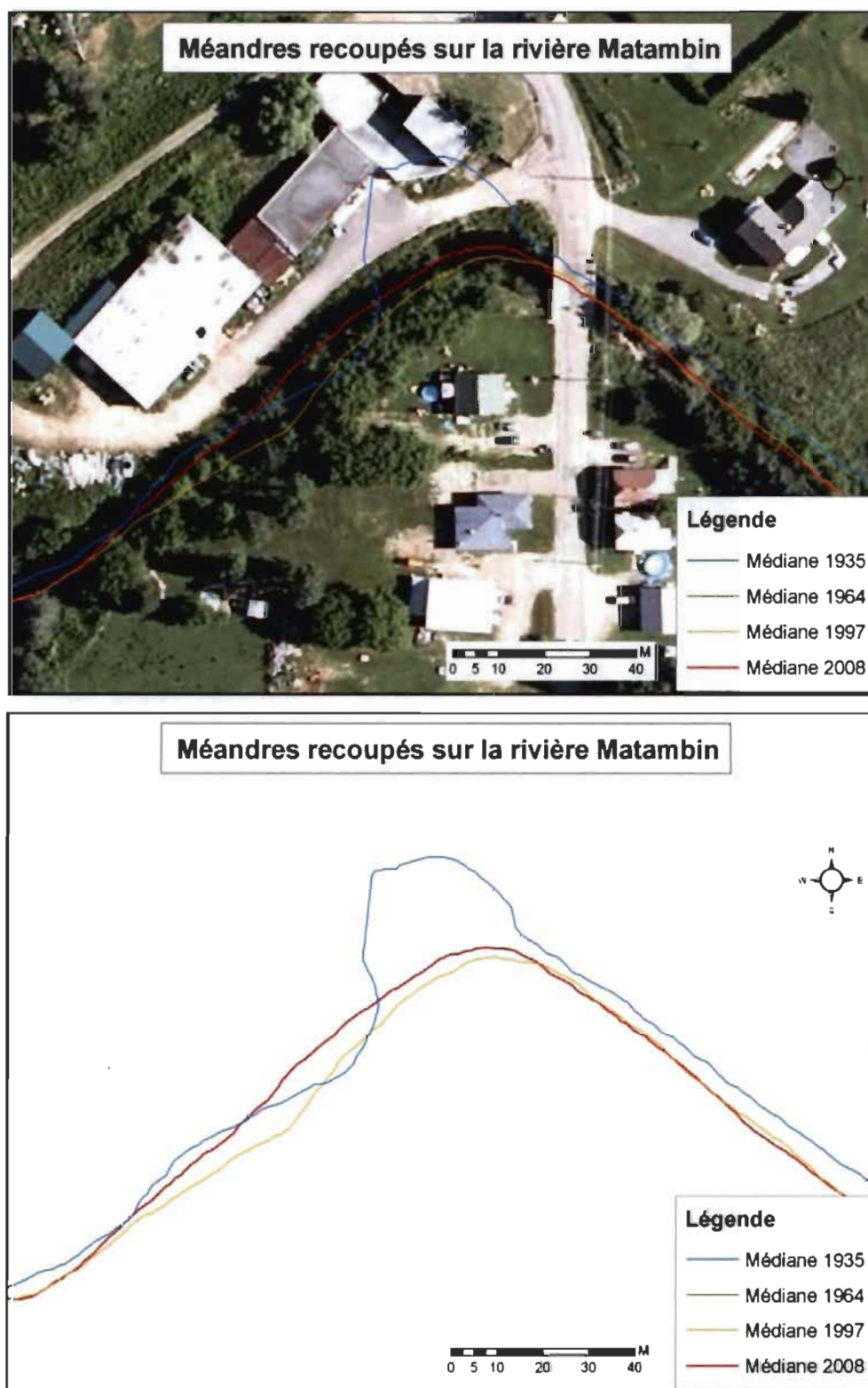


Figure 3.13 : Méandre recoupé 6.

CHAPITRE IV

DISCUSSION

Dans le cadre de cette étude, on a analysé l'évolution morphologique du chenal de la rivière Matambin en relation avec la variabilité des débits et l'évolution de la superficie forestière dans le bassin versant.

4.1 Variabilité interannuelle des débits

En ce qui concerne la variabilité des débits, en raison de l'absence d'une station de mesure des débits dans le bassin versant de la rivière Matambin, on a analysé les débits des rivières Maskinongé dans laquelle se jette la rivière Matambin et ceux de L'Assomption mesurés à la station de Joliette. On a démontré que les débits saisonniers de ces deux rivières étaient corrélés entre eux. L'application de la méthode de Lombard a permis de mettre en évidence un changement significatif des débits maximums journaliers en hiver seulement pour les deux rivières. Ce changement, qui s'est traduit par une hausse des débits dans le temps, est survenu au début de la décennie 1970. Trois hypothèses peuvent être invoquées pour expliquer cette hausse des débits en hiver.

- 1) Rappelons qu'au Québec, en raison de son climat tempéré continental, les précipitations tombent presque exclusivement sous forme de neiges en hiver. Ceci inhibe le ruissellement de surface et provoque par le fait même la diminution des débits dans les chenaux de rivières. Il s'ensuit que l'écoulement hivernal provient essentiellement des nappes souterraines dont la recharge se produit principalement au printemps et, dans une moindre mesure, en automne (Larocque et Pharand, 2010). En rive nord du fleuve Saint-Laurent sur laquelle se situe la rivière Matambin, Assani *et al.* (2011a) ont observé une corrélation significative entre les débits printaniers et les débits moyens saisonniers hivernaux. De fait, ces auteurs ont observé une hausse significative des débits moyens journaliers printaniers et hivernaux depuis la décennie 1970. Leur

étude couvrait la période 1950-2000. Cependant, l'analyse des débits printaniers des rivières Maskinongé et L'Assomption n'a révélé aucun changement significatif de ces débits. Cette différence de résultats pourrait être attribuée à celle de la période analysée. De plus, l'étude d'Assani *et al.* (2011a) était fondée sur une approche régionale et non sectorielle. Quoiqu'il en soit, il est reconnu qu'au Québec, depuis l'Holocène supérieure (trois derniers millénaires), les débits hivernaux ont significativement augmenté provoquant ainsi la hausse de niveaux de lacs et favorisant la formation des tourbières (p. ex. Carcaillet et Richard, 2000; Hétu, 2008). La hausse des débits hivernaux observée pendant la période 1930-2008 dans le bassin versant de Matambin s'inscrirait-elle dans cette tendance à long terme de hausse des débits hivernaux au Québec?

- 2) Même si la contribution des débits automnaux à la recharge de nappes est relativement modérée comparativement à celle des débits printaniers, elle n'en est pas pour autant négligeable. En effet, avant le gel des sols, les pluies et les débits automnaux contribuent à la recharge des nappes aquifères après la sécheresse estivale. Cette recharge automnale peut ainsi contribuer à la hausse des débits hivernaux. À ce propos, dans une étude récente, Assani *et al.* (2011b) avaient suggéré qu'au Québec, les débits extrêmes journaliers hivernaux seraient principalement influencés par les pluies et les débits automnaux alors que les débits moyens journaliers hivernaux le seraient par les précipitations hivernales et les débits printaniers. Or, les débits automnaux des rivières Maskinongé et L'Assomption ont significativement augmenté. Cette hausse pourrait ainsi expliquer celle des débits maximums journaliers hivernaux de ces deux rivières.
- 3) La hausse des précipitations hivernales va influencer les débits hivernaux de deux manières : la quantité de pluies qui tombent en hiver et celle de la neige qui recharge les nappes au printemps. En ce qui concerne la quantité de pluies en hiver, en raison de la hausse de température associée à des masses d'air relativement douces, les précipitations peuvent tomber quelquefois sous

forme de pluie et générer ainsi un ruissellement de surface capable de provoquer une hausse des débits dans les chenaux. L'analyse des pluies totales en hiver à la station de Joliette a révélé une tendance à la hausse depuis 1930. Ceci pourrait expliquer aussi une hausse des débits maximums et moyens journaliers en hiver. Quant à la quantité de neige qui tombe en hiver, aucune tendance à la hausse n'a été observée à la station de Joliette. On peut conclure que ce facteur ne peut rendre compte de la hausse des débits hivernaux.

4.2 L'évolution de la superficie forestière et son impact sur les débits

L'analyse diachronique des photographies aériennes a permis de mettre en évidence une hausse de la superficie forestière dans le bassin versant entre 1936 et 2008. Plus de 20 % de la superficie du bassin versant ont été reboisés, surtout après 1975. Au Québec, en particulier, plusieurs études se sont surtout intéressées aux impacts hydrologiques du déboisement (p. ex. Caissie *et al.*, 2002; Lavigne *et al.*, 2004; Ordre des Ingénieurs Forestiers du Québec, 1996). Ainsi, toutes ces études ont démontré que la diminution de la superficie forestière dans un bassin versant provoquait une hausse significative des débits minimums et maximums. Mais cette hausse était plus importante pour les débits minimums que pour les débits maximums. Toutefois, Alila *et al.* (2009) ont remis en question les méthodes utilisées dans le cadre de ces études. Quoi qu'il en soit, sur la base des résultats obtenus sur les effets de déboisement, cette hausse de la superficie forestière dans le bassin versant de la rivière Matambin ne peut pas expliquer la hausse des débits hivernaux. Un reboisement devrait, en principe, provoquer une baisse des débits minimums, et dans une moindre mesure, celle des débits maximums. Muma *et al.* (2011) avaient démontré qu'au Québec, l'augmentation de la superficie agricole au détriment de celle des forêts provoquait une baisse des débits minimums au printemps et en été. Aucun impact ne fut observé sur les débits maximums journaliers. Les travaux effectués dans d'autres pays sont contradictoires sur les impacts hydrologiques du reboisement. Certains auteurs ont démontré que le reboisement entraînait une diminution des débits (p. ex. Bosch, 1979; Lane *et al.*, 2005; Scott and

Smith, 1997). Par contre, d'autres ont observé une hausse de pics de crues (voir Mount *et al.*, 2005) associée à ce phénomène.

En ce qui concerne les impacts morphologiques du reboisement, il n'existe encore aucune étude au Québec sur ce sujet. En revanche, de nombreux travaux ont été effectués dans d'autres pays. Trois impacts morphologiques induits par le reboisement ont été observés principalement en Grande Bretagne (Mount *et al.*, 2005) :

- 1) Une hausse de taux d'érosion des berges (p. ex. Ferguson et Stott, 1987; Leeks, 1992; Stott, 1997).
- 2) Une hausse de la charge des sédiments transportés en suspension (p. ex. Ferguson et Stott, 1987; Francis et Taylor, 1989; Johnson, 1993)
- 3) Enfin, une hausse de la charge des sédiments transportés par charriage (p. ex. Ferguson et Stott, 1987; Johnson, 1993; Leeks, 1992; Moore et Newson, 1986; Stott, 1997.

Cependant, dans le bassin versant étudié par Mount *et al.* (2005) en Grande Bretagne, ces impacts n'ont pas été observés. Ces auteurs conclurent que le reboisement n'avait qu'un impact morphologique mineur.

Cette divergence des résultats entre ces différents auteurs résulte du fait que le reboisement n'induit pas les mêmes impacts hydrologiques et morphologiques. De fait, ces impacts varient en fonction des climats ainsi que des caractéristiques physiographiques et lithologiques des bassins versants. La même divergence sur ces impacts a été observée en ce qui concerne la déforestation (action contraire au reboisement). Ainsi, selon Cosandey *et al.* (2005), les impacts induits par la déforestation sur les débits extrêmes maximums et minimums sont différents en Amérique du Nord et en Europe Occidentale. Même en Amérique du Nord, Poff *et al.* (2006) ont observé une différence dans les impacts induits par la déforestation et l'agriculture sur les débits extrêmes dans les différents bassins versants aux États-Unis.

4.3 Relation entre l'évolution de la couverture forestière, des débits et de la morphologie du chenal de la rivière Matambin

La relation entre l'évolution de la couverture forestière et l'évolution morphologique du chenal de la rivière Matambin peut être subdivisée en deux périodes bien distinctes : avant et après 1964.

4.3.1 La période 1935-1964

Cette période est caractérisée par une hausse importante de la superficie boisée associée à une diminution de la largeur moyenne à plein bord du chenal de la rivière Matambin. Cette hausse de 32,37 % de la superficie de la forêt correspond à une baisse de l'ordre de 21 % de la largeur moyenne du chenal. Aucun changement significatif de la sinuosité n'a pas été observé malgré quelques recoupements des méandres. Plusieurs facteurs peuvent être invoqués pour expliquer cette baisse de la largeur moyenne du chenal malgré une hausse de la surface boisée.

- 1) La baisse de la magnitude des débits de crues. Selon les équations de Schumm (1968), lorsque la magnitude des débits diminue, la largeur du chenal peut diminuer. L'analyse des débits maximums journaliers durant les quatre saisons n'a révélé aucun changement statistiquement significatif de ces débits pour les deux rivières de la région, à savoir les rivières L'Assomption et Maskinongé. Néanmoins, en ce qui concerne la rivière L'Assomption dont les séries des débits étaient complètes, on a observé que la fréquence des débits printaniers de magnitude $\geq 200 \text{ m}^3/\text{s}$ était plus élevée après qu'avant 1970. De plus, c'est pendant la période 1930-1970 qu'on a enregistré la plus faible fréquence des débits de magnitude $\geq 150 \text{ m}^3/\text{s}$ au printemps dans la rivière Maskinongé. Ceci pourrait donc expliquer en partie la diminution de la largeur moyenne à plein bord du chenal pendant cette période. Rappelons, l'évolution morphologique d'un chenal dépend principalement de débits de forte magnitude.

2) La baisse de la largeur moyenne du chenal pendant cette période peut être expliquée aussi par un apport important de la charge en suspension. Selon les équations de Schumm (1969), l'augmentation de la charge en suspension dans un bassin versant peut provoquer une diminution de la largeur du chenal par le processus de sédimentation. Entre 1935-1960, l'agriculture était encore pratiquée de manière traditionnelle sans une protection efficace des sols contre l'érosion. Ainsi, les apports de la charge en suspension aux rivières demeuraient relativement élevés. Ces apports pourraient ainsi contribuer au rétrécissement du chenal malgré une hausse importante de la superficie reboisée. L'effet de ce reboisement serait limité pendant cette période par les facteurs suivants :

- Ce reboisement s'était étalé sur une période de 29 ans, protégeant ainsi mal le sol au début.
- Au moment de la plantation des arbres, la protection des sols contre l'érosion était mal assurée en raison de l'âge et de la faible densité des arbres plantés. En effet, il faut mentionner que les effets des arbres sur le cycle de l'eau (notamment le ruissellement de surface) dépendent de leur âge et de leur densité des arbres. Plus les arbres sont jeunes et moins denses, moins ils protègent efficacement le sol contre l'érosion exercée par les eaux de ruissellement.
- Il est possible de postuler aussi que le reboisement a commencé ou a été important vers la fin de cette période, c'est-à-dire vers la décennie 1950. Ainsi durant les deux premières décennies (1930 et 1940), le sol dans la zone agricole n'était pas encore protégé par les arbres. Ceci expliquerait un apport important des sédiments provenant de l'érosion des sols à la rivière.
- Enfin, il est bien connu que les effets hydromorphologiques de déboisement ou de reboisement ne se manifestent qu'à condition d'atteindre un certain seuil. Au Québec par exemple, les effets

hydrologiques de l'agriculture à la suite du déboisement ne se manifestent que lorsque la superficie agricole atteint un seuil $\geq 10\%$. Avant ce seuil, on n'observe aucun effet de l'agriculture sur les débits minimums journaliers de rivières (Muma *et al.* 2011). Cependant on ignore le seuil de manifestation des effets hydrologiques du reboisement. On peut postuler que ce seuil soit plus élevé que celui du déboisement, car pour que les arbres agissent sur le cycle de l'eau (ruissellement), il faut qu'ils atteignent un certain âge et une certaine densité comme nous l'avons déjà mentionné. En se fondant sur cet argument, la diminution de la largeur moyenne à plein bord du chenal entre les années 1935 et 1964, malgré une hausse du couvert végétal, pourrait s'expliquer par le fait que ce couvert végétal n'avait pas encore atteint un seuil critique au-delà duquel se manifestent les effets du reboisement sur le ruissellement de surface. En d'autres termes, la surface reboisée n'avait pas encore atteint un seuil critique pour réduire significativement l'érosion des sols par les eaux du ruissellement. Lorsque ce seuil a été atteint, les effets du reboisement ont commencé à se manifester sur l'évolution morphologique du chenal par le biais de la diminution de la charge en suspension transportée par la rivière.

À la lumière de ces considérations, on peut attribuer la diminution de la largeur moyenne du chenal de la rivière Matambin pendant la période 1935-1964, malgré une hausse importante de la superficie reboisée dans la zone agricole, à la faible fréquence des débits printaniers de forte magnitude et à la charge en suspension transportée par la rivière qui aurait été encore relativement importante entre 1935-1964. Cette diminution a été aussi observée dans la rivière L'Assomption pendant la même période même si ce bassin versant n'a pas connu un reboisement important (Aubry *et al.*, 2012, en révision).

4.3.2 La période 1964-2008

Cette période est caractérisée par une hausse de la surface du couvert forestier. Cette hausse a atteint 25,5 %. Si on tient compte de la superficie reboisée entre

1935-1964, la superficie totale de la zone agricole reboisée en 2008 est d'environ 58 %, soit près du double de celle observée en 1964. Cependant, contrairement à la première période, cette hausse de reboisement est associée à une augmentation significative de la largeur moyenne à plein bord de la rivière de l'ordre de 10 %. Ce taux de variation est beaucoup plus faible que celui observé entre 1935 et 1964. Quant à la sinuosité, aucun changement significatif ne fut observé pendant cette seconde période, et ce malgré le recouplement des méandres.

La hausse de la largeur moyenne du chenal parallèlement à celle de la surface reboisée peut être expliquée par les deux facteurs suivants :

- 1) La hausse de la fréquence des débits de forte magnitude observée après 1970 (voir tableau 3.2). Cette hausse pourrait favoriser l'érosion des berges et contribuer ainsi à l'élargissement du chenal.
- 2) La diminution probable de la quantité de la charge des sédiments en suspension transportée par la rivière en raison de l'augmentation de la superficie boisée d'une part, et probablement, de l'amélioration des techniques agricoles pour mieux protéger les sols contre l'érosion, d'autre part. De plus, il faut rappeler que les arbres étaient plus âgés après qu'avant 1964. De même, la densité des arbres était plus élevée après qu'avant 1964. Par conséquent, les effets du reboisement sur le ruissellement de surface étaient plus efficaces après qu'avant 1964. Cette efficacité s'est améliorée au fil des années.

À la lumière de ces considérations, on peut postuler que les effets de reboisement sur l'évolution morphologique du chenal de la rivière Matambin se sont manifestés lorsque la surface reboisée aurait dépassé au moins 30 % après 1964.

CHAPITRE V

CONCLUSION

Les impacts induits par la déforestation ou le reboisement sur les régimes hydrologiques et l'évolution morphologique des chenaux des cours d'eau peuvent varier d'un bassin versant à un autre en fonction de nombreux facteurs. Cette étude avait pour but d'analyser l'évolution morphologique d'un petit cours d'eau dans un contexte de reboisement d'une portion du bassin versant. Il importe de mentionner qu'à notre connaissance, il n'existe encore aucune étude au Québec sur les impacts de reboisement sur les régimes hydrologiques et l'évolution morphologique des cours d'eau. On ignore ainsi les changements induits par ce reboisement. Dans cette étude, on a donc tenté de combler cette lacune. Dans une étude récente, Muma *et al.* (2011) ont démontré que la magnitude des débits maximums journaliers n'était pas influencée par la superficie agricole dans un bassin versant au Québec. Dans le cas de reboisement, l'absence de données des débits dans le bassin versant de la rivière Matambin n'a pas permis de déterminer l'impact du reboisement sur ces débits. Toutefois, l'analyse des débits maximums journaliers dans deux bassins versants qui connaissent le phénomène de reboisement n'a pas permis d'attribuer le changement des débits maximums journaliers observés en hiver au phénomène de reboisement. Quant aux débits maximums journaliers des autres saisons, ils n'ont subi aucun changement significatif.

Par ailleurs, en ce qui concerne la charge en suspension qui est une variable majeure susceptible d'influencer l'évolution morphologique des cours d'eau, on ne dispose pas de données collectées sur une période relativement longue pour déterminer l'évolution de cette variable dans les différents bassins versants agricoles du Québec. Ce type de données aurait servi à déterminer les impacts de l'évolution des techniques agricoles sur l'érosion des sols. Dans le cadre de ce travail, on a postulé que la charge en suspension transportée par la rivière Matambin aurait diminué dans le temps en raison de l'augmentation de la superficie du reboisement dans le bassin versant. En

conséquence, cette diminution aurait un impact sur l'évolution de la charge en suspension conformément aux équations de Schumm (1969). Pour étayer cette hypothèse, une des pistes de recherche future consisterait vraisemblablement à une analyse de l'épaisseur des sédiments accumulés dans les plaines alluviales afin de pouvoir reconstituer le taux d'accumulation des sédiments dans ces milieux en relation avec le taux de reboisement dans le bassin versant. Cette reconstitution permettra ainsi d'estimer la variabilité de taux d'érosion des sols en fonction de l'évolution des techniques agricoles dans le bassin versant de la rivière Matambin.

Enfin, le changement qui affecte la largeur des cours d'eau peut résulter de l'interaction de nombreux facteurs majeurs et secondaires dont les données ne sont pas toujours disponibles. Mais il ne fait aucun doute que l'analyse diachronique des chenaux de cours d'eau constitue la meilleure méthode pour retracer l'influence des facteurs majeurs sur le changement qui affecte la largeur des cours d'eau. Dans ce contexte, au Québec, si on exclut les mouvements tectoniques, les facteurs majeurs de l'évolution morphologique des cours d'eau sont sans conteste les débits de rivières d'une part, et les changements de l'utilisation des sols (facteur d'origine anthropique), d'autre part. Dans le cadre de cette étude, on a confronté ces deux facteurs pour expliquer l'évolution morphologique du chenal de la rivière Matambin. Il ressort de cette étude que le changement de la largeur observé serait le résultat de la variabilité de la fréquence des débits de crue de forte magnitude et de la hausse de la superficie du couvert forestier. Une diminution de la fréquence des débits de forte magnitude associée à un faible taux de reboisement induirait un rétrécissement du chenal en raison probablement de la quantité de la charge en suspension relativement élevée transportée par la rivière. En revanche, une hausse de cette fréquence associée à un taux de reboisement relativement élevé provoque un élargissement du chenal. Ces deux types d'évolution sont compatibles avec les équations proposées par Schumm (1969) pour prédire l'évolution morphologique des chenaux en fonction de la variation des débits et de la charge en suspension. Il existe donc une adéquation entre les modèles théoriques proposés par Schumm et les faits observés dans le bassin versant de la rivière Matambin. Cependant, ces conclusions doivent être vérifiées sur une large gamme des bassins versants au

Québec. Il n'en reste pas moins que notre étude n'inclut pas l'évolution de la profondeur de la rivière, variable importante qui permet d'expliquer l'évolution de la méandration d'un cours d'eau.

En guise de conclusion générale, dans les régions industrialisées comme le Québec, on assiste à une diminution des superficies des sols consacrées à l'agriculture pour diverses raisons socio-économiques. Les superficies, jadis consacrées à l'agriculture, le sont maintenant aux jachères et au reboisement. Mais, on ignore encore les impacts de cette transformation d'usage de sols sur les plans hydrologique et morphologique. Dans cette perspective, sans apporter une réponse définitive à cette problématique, notre étude a cependant le mérite de soulever deux questions fondamentales : (1) quels sont les impacts du reboisement sur la variabilité interannuelle des débits et l'évolution morphologique des chenaux au Québec? (2) à partir de quel seuil, les effets du reboisement commencent-ils à se manifester? Les réponses à ces questions contribueront sans nul doute à une meilleure gestion des bassins versants agricoles dans le contexte actuel du reboisement au Québec.

BIBLIOGRAPHIE

- Alibert, M., Assani, A.A., Gratton, D., Leroux, D., Laurencelle, M. 2011. Statistical analysis of the evolution of semialluvial stream channel upstream from an inversion-type reservoir: The case of the Matawin River (Quebec, Canada). Geomorphology **131**: 28-34.
- Alila, Y., Kuras, P.K., Schnorbus, M., Hudson, R. 2009. Forests and floods: A new paradigm sheds light on age-old controversies, *Water Resources Research*, 45, W08416, doi:10.1029/2008WR007207.
- Allan, J. D. (2004). "Landscapes and riverscapes: The influence of land use on stream ecosystems." Annual Review of Ecology Evolution and Systematics **35**: 257-284.
- Armstrong, R. N. and L. W. Martz (2007). "Effects of reduced land cover detail on hydrological model response." Hydrological Processes **22**: 2395-2409.
- Assani, A. A., T. Buffin-Bélanger et A.G. Roy. (2002). "Analyse d'impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada)." Revue des sciences de l'eau **15**: 557-574.
- Assani, A. A., E. Gravel, T. Buffin-Bélanger et A.G. Roy (2005). "Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada)." Revue des sciences de l'eau **18**: 103-127.
- Assani, A. A., F. Lajoie, et C. Laliberté (2007). "Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec." Revue des sciences de l'eau **20**: 127-146.
- Assani, A. A., F. Lajoie, M.-E. Vadnais et G. Beauchamps (2008). "Analyse de l'influence de l'oscillation arctique sur la variabilité interannuelle de précipitations dans le bassin versant de la rivière Saint-François (Québec, Canada) au moyen de la méthode des corrélations canoniques." Revue des sciences de l'eau **21**: 21-33.
- Assani, A. A., F. Lajoie, M.-E. Vadnais, S. Benseghir et C. Bureau (2006). "Modes de variabilité temporelle des débits moyens annuels et leurs liens avec les indices climatiques au Québec (Canada)." Géographie physique et Quaternaire **60**: 215-224.

- Assani, A.A., Petit, F. (2003) "Impact of hydroelectric power releases on the morphology and sedimentology of the bed of the Warche river (Belgium)", Earth Surface Processes and Landforms **29**: 133-143.
- Assani, A. A., F. Petit, T. Buffin-Bélanger et A.G. Roy (2003). "Analyse de la variation spatio-temporelle de la morphologie du chenal de la Warche en amont du barrage de Butgenbach (Belgique)." Zeitschrift fur Geomorphologie **47**: 469-483.
- Assani, A. A., É. Stichelbout, A.G. Roy et F. Petit (2006). "Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes in Québec (Canada) " Hydrological Processes **20**: 3485-3501.
- Assani, A.A., Landry, R., Laurencelle, M. 2011a. Comparison of inter-annual variability modes and trends of seasonal precipitation and streamflow in Southern Quebec (Canada). Rivers Research and Applications, doi: 10.1002/rra1544 (in press).
- Assani, A.A., Chalifour, A., Légaré, G., Manouane, C-S., Leroux, D. 2011b. Temporal regionalization of 7-day low flows in The St-Lawrence watershed in Quebec (Canada). Water Resources Management (accepté)
- Association pour la gestion intégrée de la rivière Maskinongé. 2008. Portrait et diagnostic du Plan directeur de l'eau du bassin versant de la rivière Maskinongé (AGIR Maskinongé) 540 p.
- Aubry, L., Assani, A.A., Biron, S., Gratton, D. (2012). Comparison of hydromorphological evolution of the L'Assomption and Ouareau rivers channels (Quebec, Canada). Rivers Research and Applications (soumis après revision).
- Beaulieu, R. (1999, révisé en 2001). Historique des travaux de drainage au Québec et état du réseau hydrographique. d. P. e. d. l. A. Ministère de l'Agriculture, Direction régionale de la Montérégie, secteur Ouest. Québec : 12 pp.
- Bergeron, N. (2008). Notes de cours *Formes et processus en milieu fluvial*, INRS.
- Bergeron, N. and A. G. Roy (1985). "Le rôle de la végétation sur la morphologie d'un petit cours d'eau." Géographie physique et Quaternaire **39**: 323-326.
- Bosch, J.M. 1979. Treatment effects on annual and dry period streamflow at Cathedral peak. South African Forestry Journal **108**: 29-37.
- Bravard, J. P. and F. Petit (2000). Les cours d'eau - Dynamique du système fluvial, Éditions Armand Collin. U **Géographie** : 222 pp.

- Bien, M. 2006. Mesures de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau dans la portion agricole du bassin versant de la rivière des Envies (Québec). Mémoire de maîtrise, UQTR, 131p.
- Bullock, A. and M. Acreman (2003). "The role of wetland in the hydrological cycle." Hydrology and Earth System Sciences **7**: 358-389.
- Caissie, D., Jolicoeur, S., Bouchard, M., Poncet, E. 2002. Comparison of streamflow between pre and post timber harvesting in Catamaran Brook (Canada). Journal of Hydrology **258**: 232-248.
- Carcaillet, C., Richard, P.J.H. 2000. Holocene changes in seasonal precipitation highlighted by fire incidence in eastern Canada. Climate Dynamics **16**: 549-559.
- Clark, J. J. and P. R. Wilcock (2000). "Effects of land-use change on channel morphology in northeastern Puerto Rico." Geological Society of America bulletin **112**: 1763-1777.
- Consandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N., Richard, D. (2005). "The hydrological impact of the mediterranean forest : A review of French research." Journal of Hydrology 301 (1-4) : 235-249
- Constantine, J. A. and T. Dunne (2008). "Meander cutoff and the control on the production of oxbow lakes." Geology **36**: 23-26.
- Durocher, M. and A. G. Roy (1986). "Les conséquences du déboisement d'un versant sur la morphologie d'un petit cours d'eau." Géographie physique et Quaternaire **11**: 99-104.
- Ferguson, R.I., Stott, T. 1987. Forestry effects on suspended sediment and bed load yields in the Balquhiddy catchments, Central Scotland. Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences **78**: 379-384.
- Francis, I.S., Taylor, J.A. 1989. The effect of forestry drainage operations on upland sediment yields: a study of two peat-covered catchments. Earth Surface Processes and Landforms **14**: 73-83.
- Gay, G. R., H. H. Gay, W.A. Gay, Martinson, H.A., R.H. Meade et J.A. Moody (1998). "Evolution of cutoffs across meander necks in Powder river, Montana, USA." Earth Surface Processes and Landforms **23**: 651-662.

- Gravel, E. (2006). "Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits minimums annuels dans le bassin versant du fleuve Saint-Laurent et les effets de leur fluctuation sur les caractéristiques de l'eau, des sédiments et de la végétation du lit mineur de la rivière Matawin (Québec)." Mémoire de maîtrise en sciences de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières : 105 p. + annexes.
- Gregory, K. J. (2006). "The human role in changing river channels." Geomorphology **79**: 172-191.
- Harden, C. P. (2004). "Fluvial response to land-use change in the Southern Appalachian region: A century of investigation." Physical Geography **25**: 398-417.
- Hétu, B. 2008. Paléohydrologie à l'Holocène supérieur dans l'Est du Québec (Canada) : l'apport des petits cônes alluviaux. Géomorphologie **1**: 45-58
- Hooke, J. M. (1995). "River channel adjustment to meander cutoffs on the river Bollin and river Dane, northwest England." Geomorphology **14**: 235-253.
- Hooke, J. M. (2004). "Cutoffs galore!: occurrence and causes of multiple cutoffs on a meandering river. ." Geomorphology **61**: 225-238.
- Hooke, J. M. (2006). "Human impacts on fluvial systems in the mediterranean region." Geomorphology **79**: 311-335.
- James, L. A. and W. A. Marcus (2006). "The human role un changing fluvial systems: Retrospect, inventory and prospect." Geomorphology **79**: 152-171.
- Jiongxin, X. 1990. Complex response in the adjustment of the Weihe River channel to constructions of the Sanmenxia resrvoir. Zeitschrift fur Geomorphologie **34**: 333-345.
- Jonhson, R.C. 1993. Effects of forestry on suspended solids and bed load yields in the Balquhiddel catchments. Journal of Hydrology **145**: 403-417.
- Jorgensen Harbor, D. (1998). "Dynamic equilibrium between an active uplift and the Sevier river, Utah." The journal of geology **106**: 181-194.
- Keesstra, S. D., J. van Huissteden, J. Vandenberghe, O. Van Dam, J. De Gier et I.D. Pleizier (2005). "Evolution of the morphology of the river Dragonja (SW Slovenia) due to land-use changes." Geomorphology **69**: 191-207.
- Kendall, M. G. (1975). Rank Correlation Measures. Charles Griffin, London.

- Kundzewicz, Z.W., Graczyk, D., Maureer, T., Pinskiwar, I., Radziejewski, M., Svensson, C., Szwed, M. 2005. Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow. Hydrological Sciences Journal **50**: 797-810.
- Lajoie, F., A. A. Assani, M. Matteau, M. Mesfioui et A.G. Roy (2006). "Comparaison entre débits réservés écologiques et débits lâchés en aval des barrages au Québec: Influence du mode de gestion des barrages, de la taille des bassins versants et de la saison." Water Quality Research Journal of Canada **41**: 263-274.
- Lajoie, F., A. A. Assani, A.G. Roy et M. Mesfioui (2007). "Impacts of monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons." Journal of Hydrology **334**: 423-439.
- Lane, E. W. (1955). "The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering." Proceedings **81**: 17.
- Lane, P.N.J., Best, A.E., Hickel, K., Zhang, L. 2005. The response of flow duration curves to afforestation. Journal of hydrology **310**: 253-265.
- Larocque M, Pharand M-C (2010) Dynamique de l'écoulement souterrain et vulnérabilité d'un aquifer du piedmont appalachien (Québec, Canada). Revue des Sciences de l'Eau **23**: 73-88.
- Laurencelle, M. (2008) « Utilisation de la géomatique pour l'analyse de l'évolution morphologique du chenal de la rivière Mattawin et autres analyses statistiques » Rapport de stage, UQTR, 81 p.
- Lavigne, M-P., Rousseau, A.N., Turcotte, R., Laroche, A-M., Fortin, J-P., Villeneuve, J-P. 2004. Validation and use of a semidistributed hydrological modelling system to predict short-term effects of clear-cutting on a watershed hydrological regime. Earth Interactions **8**: 1-19.
- Leduc, C. and A. G. Roy (1990). "L'impact du drainage agricole souterrain sur la morphologie des petits cours d'eau dans la région du Cookshire, Québec." Géographie physique et Quaternaire **44**: 235-239.
- Leeks, G.J.L. 1982. Impact of plantation forestry on sediment transport processes. In: Billi, P., Hey, R.D., Thorne, C.R., Tacconi, P. (eds.), Dynamics of Gravel-Bed Rivers. Wiley, Chichester, pp.651-670.
- Lombard, F. (1987) Rank tests for changepoint problems. Biometrika **74**: 615-624

- Mann, H. B. (1945). "Nonparametric test against trend." Econometrica **13**: 245-259.
- Mathier, L. and A. G. Roy (1992). "Hydrogrammes du ruissellement superficiel et transport des sédiments en milieu agricole." Revue des sciences de l'eau **5**: 1-21.
- Matteau, M. (2009). "Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impact studies." Journal of hydrology **371**: 120-128.
- Matteau, M., A. A. Assani, F. Lajoie et S. Campeau (2006). Choix de la variable pertinente pour estimer les débits annuels maximums en aval des barrages au Québec. Actes du Congrès annuel pour l'Association Canadienne des Barrages, 30 septembre au 5 octobre. Québec: 6 p.
- Menv (2003). Synthèse des informations environnementales disponibles en matière agricole au Québec. Québec, Direction des politiques du secteur agricole, Ministère de l'Environnement, Québec : 143 pp.
- Milette, G. (2008). "Comparaison de la richesse spécifique, de l'abondance et de la composition des macrophytes du lit mineur de la rivière Matawin en amont et en aval du réservoir Taureau (Québec, Canada)." Mémoire de maîtrise en sciences de l'Environnement, Université du Québec à Trois-Rivières : 77 p. + annexes.
- Moore, R.J., Newson, M.D. 1986. Production, storage and output of coarse upland sediments: natural and artificial influences as revealed by research catchment studies. Journal of the Geological Society London **143**: 921-926.
- Mount, N.J., Smith, G.H.S., Stott, T.A. 2005. An assessment of the impact afforestation on lowland river reaches: the Afon Tranon, mid-Wales. Geomorphology **64**: 255-269.
- Muma, M. (2008). "Impacts de l'utilisation des sols sur la variabilité spatio-temporelle des débits extrêmes au Québec méridional." Mémoire de maîtrise en sciences de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières : 96 pp.
- Muma, M., Assani, A.A., Landry, R., Quessy, J.F., Mesfioui, M. 2011. Effects of the change from forest to agriculture land use on the spatial variability of summer extreme daily flow characteristics in Southern Quebec (Canada). Journal of hydrology, 407: 153-163.
- Ordre des Ingénieurs Forestiers du Québec. 1996. Hydrologie forestière et aménagement du bassin hydrographique, in Manuel de Foresterie, Presses de l'Université Laval, St-Nicolas, Québec, 281-329.

- Peterson, J. T. and T. J. Kwak (1999). "Modeling the effects of land use and climate change on riverine smallmouth bass." Ecological Application **9**: 1391-1404.
- Poff, N. L., B. P. Bledsoe et C.O. Cuhaciyan (2006). "Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems." Geomorphology **79**: 264-285.
- Quessy, J-F, Favre, A-C, Saïd, M., Champagne, M. 2011. Statistical inference in Lombard's smooth-change model. Environmetrics **22**: 882-893
- Rosgen, D. L. (1996). "A classification of natural rivers: reply to the comments by J.R. Miller and J.B. Ritter." Catena **27**: 301-307.
- Scott, T. (1997). Forestry effects on bedload yields in mountain streams. Applied Geography **17**: 55-78
- Scott, D.F., Smith, R.E. (1997). Preliminary empirical models to predict reductions in total and low flows resulting from afforestation. Water S.A. **23**: 135-140.
- Schumm, S. A. (1969). "River metamorphosis." Journal of Hydraulics Division. Proceedings of the America Society of Civil Engineers **HY1**: 255-273.
- Sneyers, R. (1795). Note technique n°143 sur l'analyse statistique des séries d'observations, Secretariat de l'Organisation Météorologique Mondiale, Genève. 192 p.
- Stichelbout, É. (2005). "Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits maximums annuels dans le bassin versant du fleuve Saint-Laurent et sur la richesse spécifique de la végétation herbacée des basses plaines alluviales de la rivière Matawin." Mémoire de maîtrise en sciences de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières: 76 p.
- St-Jacques, N., Richard, Y. (1998). " Développement d'un indice de qualité de la bande riveraine: application à la rivière Chaudière et mise en relation avec l'intégrité biotique du milieu aquatique." pages 6.1 à 6.41, dans ministère de l'Environnement et de la Faune (éd.), *Le bassin de la rivière Chaudière : l'état de l'écosystème aquatique - 1996*, Direction des écosystèmes aquatiques, Québec, envirodoq no EN980022.
- Stølum, H. H. (1996). "River meandering as a self-organization process." Science **271**: 1710-1713.

- Tomer, M. D., D. W. Meek, *et al.* (2005). "Agricultural practices influence flow regimes of headwater streams in Western Iowa." Journal of Environmental Quality **34**: 1547-1558.
- Urban, M. A. and B. L. Rhoads (2003). "Catastrophic human-induced change in stream-channel planform and geometry in an agricultural watershed, Illinois, USA." Annals of the Association of American Geographers **93**: 783-796.
- Vanacker, V., A. Molina, G. Govers, J. Poesen, G. Dercon et S. Deckers (2005). "River channel response to short-term human-induced change in landscape connectivity in Andean ecosystems." Geomorphology **72**: 340-353.
- Voulligny, C. et Gariépy, S. (2006) " Les friches agricoles au Québec: État des lieux et approches de valorisation." Agriculture et Agroalimentaire Canada: 66p.
- Wang, G., J. Liu, J. Kubota et L. Chen (2007). "Effects of land-use changes on hydrological processes in the middle basin of the Heihe River, northwest China." Hydrological Processes **21**: 1370-1382.
- Wissmar, R. C., R. K. Timm et M.G. Logsdon (2004). "Effects of changing forest and impervious land covers on discharge characteristics of watersheds." Environmental Management **34**: 91-98.
- Yue, S., P. Pilon et G. Cavadias (2002). "Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series." Journal of Hydrology **259**: 254-271.

ANNEXE A

COMPARAISON DE LA VARIABILITÉ INTERANNUELLE DES DÉBITS MOYENS JOURNALIERS DES RIVIÈRES L'ASSOMPTION (EN BLEU) ET MASKINONGÉ (EN ROUGE)

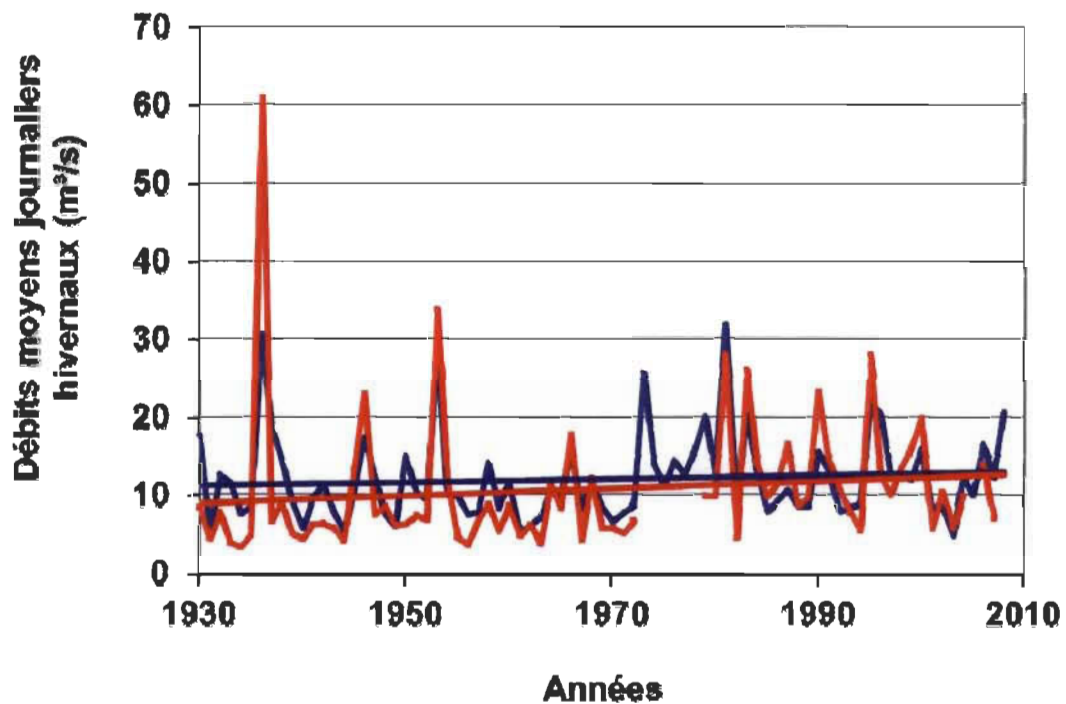


Figure A1 : Comparaison de la variabilité interannuelle des débits moyens journaliers hivernaux des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge).

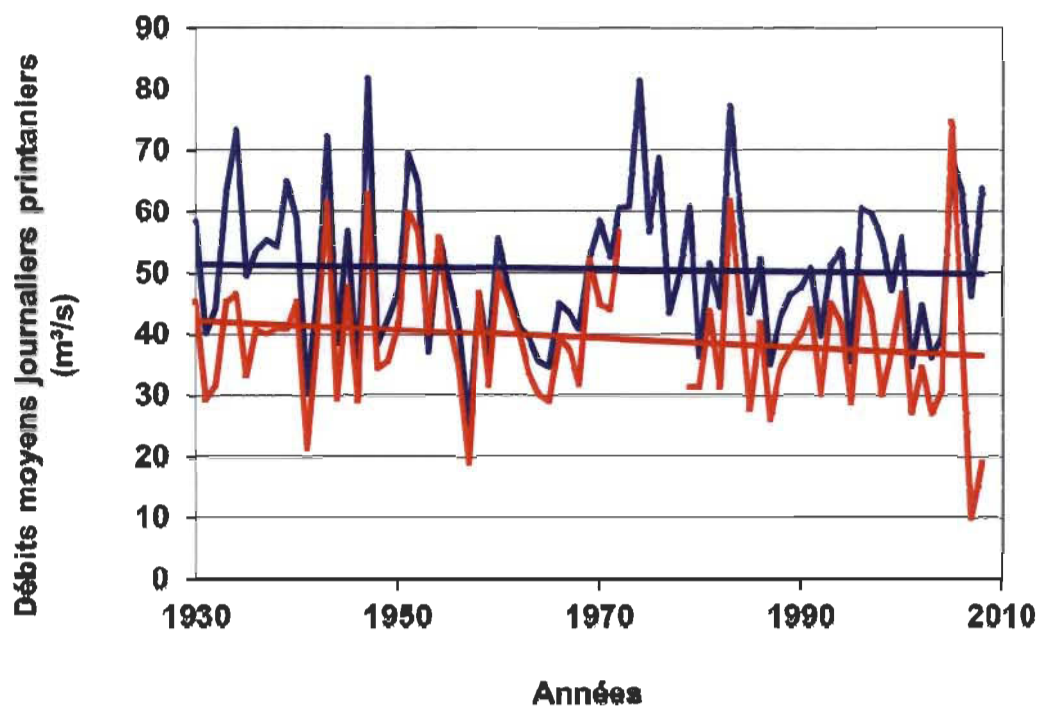


Figure A2 : Comparaison de la variabilité interannuelle des débits moyens journaliers printaniers des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge).

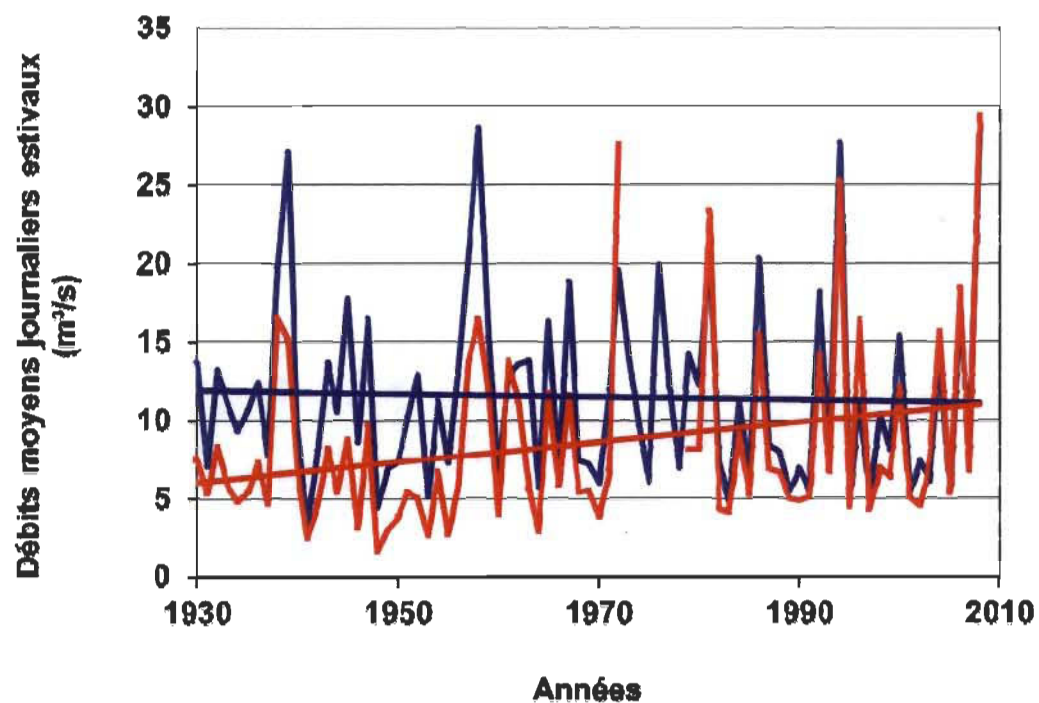


Figure A3 : Comparaison de la variabilité interannuelle des débits moyens journaliers estivaux des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge).

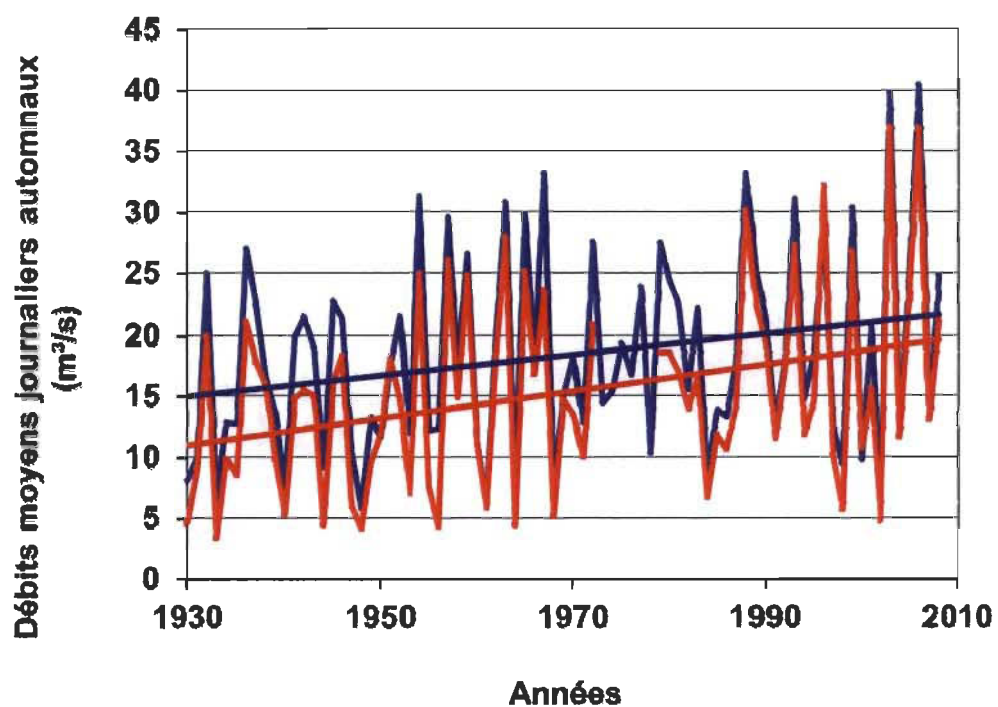


Figure A4 : Comparaison de la variabilité interannuelle des débits moyens journaliers automnaux des rivières L'Assomption (en bleu) et Maskinongé (en rouge).

ANNEXE B

RÉSULTATS OBTENUS LORS DU GÉORÉFÉRENCEMENT DES PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES

Tableau B1

Résultats obtenus lors du géoréférencement de l'année 1935

Photos	Erreur pts fiduciaux	Nbre de pts de contrôle	Erreur RMS en Pixel			Erreur RMS au sol (M)		
			<i>RMS</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>RMS</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
1	0.5	5	1.8	0.53	2.5	1.09	0.32	1.52
3	0.7 (.031mm)	6	2.73	1.47	2.98	1.67	0.88	1.82
5	0.3 (.013mm)	5	2.47	0.66	2.66	1.5	0.4	1.61
7	0.6 (.026mm)	6	2.72	1.52	3.52	1.66	0.95	2.15
9	0.6 (.025mm)	6	3.57	0.47	4.26	2.12	0.28	2.54
<i>Moyennes</i>			2.66	0.93	3.18	1.61	0.57	1.93

Tableau B2

Résultats obtenus lors du géoréférencement de l'année 1964

Photos	Erreur pts fiduciaux	Nbre de pts de contrôle	Erreur RMS en Pixel			Erreur RMS au sol (M)		
			<i>RMS</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>RMS</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
45	0.1	5	1.26	0.2	1.69	0.88	0.14	1.18
46	0.5	5	1.38	0.73	1.69	0.97	0.5	1.21
47	0.5 (.020mm)	6	0.96	0.29	1.44	0.68	0.2	1.02
49	0.6 (.027mm)	6	1.88	0.94	2.4	1.32	0.68	1.86
50	0.6 (.027mm)	6	1.22	0.2	1.7	0.88	0.06	1.23
51	0.4 (.017mm)	5	2.28	1.33	2.79	1.66	0.95	2.05
52	0.4 (.017mm)	6	2.4	0.13	2.73	1.77	0.09	2.02
<i>Moyennes</i>			1.63	0.55	2.06	1.17	0.37	1.51

Tableau B3

Résultats obtenus lors du géoréférencement de l'année 1975

Photos	Erreur pts fiduciaux	Nbre de pts de contrôle	Erreur RMS en Pixel			Erreur RMS au sol (M)		
			<i>RMS</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>RMS</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
171	0.7 (.029mm)	5	1.64	0.73	2.58	1.23	0.55	1.92
172	0.7 (.029mm)	7	2.55	1.87	3.41	1.89	1.38	2.54
<i>Moyennes</i>			2.10	1.3	2.99	1.56	0.96	2.23

Tableau B4

Résultats obtenus lors du géoréférencement de l'année 1997

Photos	Erreur pts fiduciaux	Nbre de pts de contrôle	Erreur RMS en Pixel			Erreur RMS au sol (M)		
			<i>RMS</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>RMS</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
227	0.1 (.005mm)	6	3.73	2.48	3.87	2.43	1.6	2.51
228	0.4 (.015mm)	7	1.48	0.3	1.83	0.96	0.2	1.2
229	0.6 (.026mm)	7	2.15	0.19	2.71	1.39	0.12	1.76
230	0.4 (.018mm)	7	3.08	1.11	3.76	1.99	0.71	2.44
231	0.3 (.011mm)	7	2.11	0.64	2.88	1.35	0.41	1.85
232	0.4 (.018mm)	5	2.36	0.53	3.4	1.51	0.34	2.18
233	0.5 (.022mm)	7	2.78	1.97	3.96	1.74	1.18	2.5
234	0.3 (.011mm)	7	3.45	1.85	3.98	2.14	1.13	2.54
235	0.5 (.021mm)	8	2.46	0.91	3.28	1.52	0.57	2.02
236	0.3 (.012mm)	6	1.99	0.74	2.47	1.23	0.45	1.54
<i>Moyennes</i>			2.56	1.07	3.21	1.63	0.67	2.05